



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ILUMINACIÓN LED: TECNOLOGÍAS APLICADAS A AUTOMOCIÓN

Alumno: Jorge Quesada Moreno

Tutor: Prof. D. Juan Domingo Aguilar Peña
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

Junio, 2023



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén



ILUMINACIÓN LED: TECNOLOGÍAS APLICADAS A AUTOMOCIÓN

Autor: Jorge Quesada Moreno
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

Junio, 2023



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática

Don Juan Domingo Aguilar Peña, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: “Iluminación LED: Tecnologías aplicadas a automoción”, que presenta Jorge Quesada Moreno, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2023

El alumno:

JORGE QUESADA MORENO

El tutor:

**AGUILAR PEÑA
JUAN
DOMINGO -
25960536E**

Firmado digitalmente
por AGUILAR PEÑA
JUAN DOMINGO -
25960536E
Fecha: 2023.07.01
17:36:15 +02'00'

JUAN DOMINGO AGUILAR PEÑA

MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y DESCRIPCIÓN	4
CONTEXTO DOCENTE	5
ANTECEDENTES	5
MOTIVACIÓN	6
OBJETIVOS	6
DESCRIPCIÓN	7
METODOLOGÍA	8
CONCLUSIONES	8
CONCEPTOS TEÓRICOS	9
1. APARICIÓN DEL DIODO EMISOR DE LUZ “LED”	9
1.1. FUNCIONAMIENTO DEL LED	11
1.2. COMPOSICIÓN DEL LED	12
2. EVOLUCIÓN DE LA ILUMINACIÓN DEL AUTOMÓVIL	14
3. TIPOS DE LED	21
3.1. TIPOS DE LED POR SU ENCAPSULADO	21
3.2. TIPOS DE LED POR SU POTENCIA	22
3.3. TIPOS DE LED POR SU LONGITUD DE ONDA	22
4.1. ILUMINACIÓN EN EL AUTOMÓVIL	23
4.1.1. INTENSIDAD LUMÍNICA	23
4.1.2. FLUJO LUMINOSO	25
4.1.3. ILUMINANCIA	26
4.1.4. LUMINANCIA	27
4.1.5. ILUMINACIÓN	29
5. DRIVERS LED	31
5.1. REGULADORES LINEALES	32
5.2. REGULADORES CONMUTADOS	33
5.2.1. CONVERTIDOR REDUCTOR	35
5.2.2. CONVERTIDOR ELEVADOR	41
5.2.3. CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR	46
5.3. EFECTOS NO IDEALES EN EL CONVERTIDOR	50
5.3.1. CAÍDAS DE TENSIÓN EN LOS INTERRUPTORES	50
5.3.2. RESISTENCIA DEL CONDENSADOR: EFECTO EN EL RIZADO	51
5.3.3. RESISTENCIA EN LA BOBINA	52
5.3.4. PÉRDIDAS DE CONMUTACIÓN	54
5.4. CONTROL DE LA FUENTES DE ALIMENTACIÓN	55
6. DRIVERS LED DE APLICACIÓN EN EL AUTOMÓVIL	65
6.1. DIFERENTES TOPOLOGÍAS SEGÚN LA APLICACIÓN EN EL AUTOMÓVIL:	68
6.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA ARQUITECTURA	71
6.2.1. BUCK	71
6.2.2. BOOST	72
6.2.3. BOOST - BUCK (DERIVADO DE BOOST)	73
6.2.4. BUCK (DERIVADO DE BOOST)	74

6.2.5. BUCK-BOOST	76
6.3. GESTIÓN APLICACIÓN MATRICIAL	77
6.3.1. FAROS ADAPTATIVOS	77
6.3.2. LMMs	77
7. INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA	81
BLOQUE PRÁCTICO	86
Descripción	87
Práctica 1. CARACTERIZACIÓN DEL LED. (PROFESOR)	88
1. INTRODUCCIÓN	88
2. OBJETO DE LA PRÁCTICA	89
3. DESCRIPCIÓN BÁSICA	89
4. LISTADO DE MATERIAL	89
5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	90
5.1. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA	90
5.2. SERIE	94
5.3. PARALELO	95
5.4. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA PARA LED DE POTENCIA (1w)	96
6. SIMULACIONES CON PSPICE	97
6.1. SIMULACIÓN SERIE	102
6.2. SIMULACIÓN PARALELO	102
7. CONCLUSIONES	103
Práctica 1. CARACTERIZACIÓN DEL LED	104
1. INTRODUCCIÓN	104
2. DESCRIPCIÓN BÁSICA	105
3. LISTADO DE MATERIAL	105
4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	106
4.1. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA	106
4.2. SERIE	109
4.3. PARALELO	110
4.4. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA PARA LED DE POTENCIA (1w)	111
5. SIMULACIONES CON PSPICE	111
6. CONCLUSIONES	111
Práctica 2. FUENTE LINEALES DE CORRIENTE PROFESOR	112
1. INTRODUCCIÓN	112
2. OBJETO DE LA PRÁCTICA	112
3. DESCRIPCIÓN BÁSICA	112
4. LISTADO DE MATERIAL	114
5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	114
5.1. CIRCUITO 1	114
5.2. CIRCUITO 2	117
5.3. CIRCUITO 3	119
6. SIMULACIONES	122

6.1. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO CON TRANSISTORES	122
6.2. MODULACIÓN PWM	125
6.3. SIMULACIÓN CIRCUITO CON DIODO ZENER	128
7. CONCLUSIONES	131
Práctica 2. FUENTE LINEALES DE CORRIENTE	133
1. INTRODUCCIÓN	133
2. OBJETO DE LA PRÁCTICA	133
3. DESCRIPCIÓN BÁSICA	133
4. LISTADO DE MATERIAL	134
5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	135
6. SIMULACIONES	141
7. CONCLUSIONES	141
Práctica 3. DRIVER REGULADORES PROFESOR	142
1. INTRODUCCIÓN	142
2. OBJETO DE LA PRÁCTICA	142
3. DESCRIPCIÓN BÁSICA	142
4. LISTADO DE MATERIAL	142
5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	143
5.1. C2LN3	143
5.2. LM317	147
5.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE	148
5.2.2. LM317 REGULADOR DE TENSIÓN	1
5.3. LM78XX	1
5.3.1. LM78XX REGULADOR DE TENSIÓN	1
5.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE	1
6. SIMULACIONES	1
6.1. CL2N3	1
6.2. LM317	1
6.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE	1
6.2.2. LM317 REGULADOR DE TENSIÓN	1
6.3. LM78XX	1
6.3.1. LM78XX REGULADOR DE TENSIÓN	1
6.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE	1
7. CONCLUSIONES	1
Práctica 3. DRIVER REGULADORES	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETO DE LA PRÁCTICA	1
3. DESCRIPCIÓN BÁSICA	1
4. LISTADO DE MATERIAL	1
5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	1
5.1. C2LN3	1
5.2. LM317	1
5.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE	1
5.2.2. LM317 REGULADOR DE TENSIÓN	1

5.3. LM78XX	1
5.3.1. LM78XX REGULADOR DE TENSIÓN	1
5.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE	1
6. SIMULACIONES	1
6.1. CL2N3	1
6.2. LM317	1
6.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE	1
6.2.2. LM317 REGULADOR DE TENSIÓN	1
6.3. LM78XX	1
6.3.1. LM78XX REGULADOR DE TENSIÓN	1
6.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE	1
7. CONCLUSIONES	1
PRÁCTICA 4. C.I. CONVERTIDORES CONMUTADOS	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA	1
3. DESCRIPCIÓN BÁSICA	1
4. LISTADO DE MATERIAL	1
5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	1
5.1. CONVERTIDOR TIPO REDUCTOR	1
5.1.1. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER	1
5.1.2. CALCULAR LA EFICIENCIA DEL C.I.	1
5.1.3. SIMULAR CON RECURSOS DEL FABRICANTE	1
5.2. CONVERTIDOR TIPO ELEVADOR	1
5.2.1. SELECCIONAR EL DRIVER	1
5.2.2. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER	1
6. CONCLUSIONES	1
PRÁCTICA 4. C.I. CONVERTIDORES CONMUTADOS	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA	1
3. DESCRIPCIÓN BÁSICA	1
4. LISTADO DE MATERIAL	1
5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA	1
5.1. CONVERTIDOR TIPO REDUCTOR	1
5.1.1. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER	1
5.1.2. CALCULAR LA EFICIENCIA DEL C.I.	1
5.1.3. SIMULAR CON RECURSOS DEL FABRICANTE	1
5.2. CONVERTIDOR TIPO ELEVADOR	1
5.2.1. SELECCIONAR EL DRIVER	1
5.2.2. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER	1
CONCLUSIONES	1
BIBLIOGRAFÍA	1
LISTADO DE FIGURAS	1

MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y DESCRIPCIÓN

CONTEXTO DOCENTE

Este trabajo que se presenta se implementará dentro del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial que se imparte en la Escuela Politécnica Superior de Jaén; habilitado para profesiones reguladas de acuerdo con la Orden CIN/311/2009, de 9 de febrero, BOE de 18 febrero de 2009.

El plan de estudios mencionado consta de 240 créditos ECTS, que se estructuran en materias obligatorias con un total de 210 créditos, Trabajo Fin de Grado con 12 créditos y 30 créditos más de materias optativas (complementos de formación). Las materias obligatorias se dividen a su vez en tres módulos: (1) Formación básica (60 ECTS), (2) Asignaturas comunes a otras ramas (60 ECTS) y (3) Tecnología específica (78 ECTS).

En la totalidad de materias obligatorias, no hay ninguna que trate el tema objeto de este trabajo, los sistemas electrónicos aplicados a la iluminación del automóvil, un tema bastante relacionado con la provincia en la que nos encontramos, Jaén, pues su mayor empresa con cerca de 3000 trabajadores en el año 2019, está situada a 30 km de la capital y en el 2021 celebró 50 años, la planta de la empresa Valeo, es el mayor centro de desarrollo de “*Visibility*” con el que cuenta la empresa internacional. De ahí la importancia de esta asignatura optativa para los alumnos del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial, contemplada dentro de la mención de sistemas electrónicos.

Este trabajo que se presenta, se enmarca dentro de la asignatura optativa “Electrónica en Sistemas de Iluminación en el Automóvil” y cuyo objetivo es trabajar más detalladamente las prácticas del laboratorio de la asignatura y dar una visión del tema desde el lado real, pues actualmente me encuentro trabajando en Valeo.

La asignatura cuenta con 6 créditos ECTS, la mitad de éstos están destinados a clases prácticas en el laboratorio (montajes didácticos y simulaciones). Cada crédito tiene asignadas 25 horas de trabajo personal.

ANTECEDENTES

Este trabajo ha sido realizado con posterioridad a otros similares realizados por compañeros de la titulación como son:

Padilla Ortega, Ana. Led de potencia: driver y aplicaciones en automoción. Trabajo Fin de Grado. E.P.S de Universidad de Jaén. Septiembre de 2019.

Redondo Cano, Julián. Tecnología led de potencia: aplicaciones en automoción. Trabajo Fin de Grado, E.P.S de Universidad de Jaén. Septiembre de 2019.

Peinado Martinez, Sergio. Electrónica en Sistemas de Iluminación en Automoción. Trabajo Fin de Grado, E.P.S de Universidad de Jaén. Septiembre de 2020.

Dichos proyectos, han servido como referencia sobre un trabajo ya realizado, para profundizar en los aspectos que he considerado más importantes con mi situación laboral y el aprendizaje de los futuros alumnos de la asignatura. Además de querer proporcionar al proyecto una pequeña visión de los componentes que se utilizan en la industria.

MOTIVACIÓN

El presente trabajo, que se presenta como trabajo final de grado, nace con el fin de dar a conocer los sistemas electrónicos de control drive, que se usan en la actualidad para la iluminación en automoción. El LED está cada día más presente en nuestras vidas, desde la bombilla de la casa, pasando por la iluminación en las calles, la iluminación del automóvil y hasta la señalización en los aviones está realizada con éstos diodos.

El material que se presenta en este trabajo será de uso en la asignatura optativa “Electrónica en sistemas de Iluminación en Automoción” del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial.

Este trabajo fue propuesto y supervisado por Juan Domingo Aguilar Peña profesor del área de tecnología del departamento de ingeniería Electrónica y Automática y realizado por Jorge Quesada Moreno, como Trabajo final del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial.

OBJETIVOS

La iluminación en el automóvil ha evolucionado significativamente desde la aparición de los mismos y con ella ha ido surgiendo la necesidad de sistemas electrónicos para el control de la iluminación.

El sentido de controlar los sistemas de iluminación es para invertir en la seguridad de los ocupantes del vehículo, iluminando con mayor intensidad la calzada para ver y ser vistos. Además de una evolución en el rendimiento energético de los sistemas.

En este trabajo se describe la evolución que han tenido los sistemas de iluminación, y las distintas tecnologías que se han ido empleado, centrándose en la iluminación led en automoción y los drivers como alimentación y control.

Qué duda cabe que la experimentación en el laboratorio de electrónica mediante el montaje y medida de distintos tipos de aplicaciones, es fundamental para los alumnos que estudian el grado. Se experimentará con los distintos tipos de excitación y control del led, así como driver lineales y conmutados. Se analizará la variación en la luminosidad según la intensidad que circule por el LED y se realizarán los cálculos pertinentes para un correcto funcionamiento en temperatura de los dispositivos, haciendo uso si fuera necesario de disipadores calculando su resistencia térmica previamente.

DESCRIPCIÓN

La distribución del trabajo se realizará en dos partes diferenciadas. Una primera parte teórica en la cual se explicará el funcionamiento de los distintos sistemas electrónicos que se van a trabajar en la segunda parte del trabajo, ésta última parte estará formada por el desarrollo práctico de los análisis de los sistemas y driver de estudio.

Además de toda la teoría que se desarrollará en la primera parte, no se puede olvidar hablar del paso del tiempo y la evolución sufrida sobre nuestra materia en análisis, la iluminación en automoción y las distintas tecnologías utilizadas para la realización del circuito electrónico o driver que gobernará el LED y todo lo que la concierne.

Será de estudio toda tecnología de iluminación que se aplique en la automoción, así también de los circuitos integrados que sean de aplicación para la misma. Tanto tecnologías presentes como futuras para el mundo de la iluminación. Serán nombrados, también, las ventajas que presenta cada sistema junto con sus inconvenientes, además de la viabilidad de uso

La segunda parte, estará formada por una propuesta de prácticas experimentales a desarrollar en el laboratorio, para ello se precisará de un cierto montaje que será explicado en cada una de las prácticas y unas medidas experimentales sobre el circuito, con el fin de graficar las características estudiadas y comentar en el apartado de conclusiones si ha sido satisfactorio el resultado conforme a los datos teóricos, prácticas y simulaciones, pues no se puede olvidar que la parte de simulación es tan importante como la experimental y también tendrá su hueco en cada una de las prácticas del apartado 2

Toda práctica del alumno tendrá también a su homóloga para el profesor, la cuál estará rellena por el montaje experimental realizado por mi parte para el desarrollo de este trabajo, los datos teóricos y las simulaciones realizadas.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo, se basa en la búsqueda de información en diversas fuentes, como libros, artículos, hojas de características, folletos de fabricante y páginas web, pero todas con un tema común la tecnología led y la iluminación en automoción. Toda la información utilizada será citada en la biografía al final del trabajo.

Además, el trabajo consta de unas prácticas experimentales con carácter docente, las cuales están compuestas por un guión para el alumno y un manual para el profesor.

El trabajo ha sido realizado en la plataforma online de google, para su redacción se usó google docs y para el tratado de los datos google spreadsheet.

Otro cambio introducido en el trabajo es reducir la cantidad de prácticas que estaban divididas por sesiones de 2 horas y realizar 4 prácticas que se dividen a lo largo de las 30 horas de sesiones prácticas. Algunas de estas prácticas duran hasta 8 horas, en las cuales los alumnos tendrán la posibilidad de continuar desde donde se quedaron en la sesión anterior y no dejar dichos apartados para final de curso en donde se habilitan sesiones de recuperación.

CONCLUSIONES

Mi aportación a la asignatura con este trabajo es:

- Manejo de una hoja de características de un LED, Driver o componente relacionado con la iluminación en la automoción.
- Profundizar en el manejo de las simulaciones con LEDs.
- Analizar los diferentes tipos de circuitos que ofrecen los fabricantes con sus driver y sus diferentes modos de control.
- Resolución de problemas similares a la realidad.
- Manejo de software de simulación de fabricantes.
- Introducción a la compatibilidad electromagnética.

El desarrollo del trabajo ha sido orientado a los conocimientos básicos en concepto de iluminación que son necesarios adquirir si trabajas como ingeniero en Valeo Martos, conocer la evolución de la iluminación hasta la actualidad, profundizar en la teoría de los sistemas electrónicos de control para la iluminación LED y el bloque práctico en el cuál he querido reflejar con las medidas en el laboratorio los problemas que aparecen en el desarrollo de un proyecto de electrónica de iluminación.

CONCEPTOS TEÓRICOS

1. APARICIÓN DEL DIODO EMISOR DE LUZ “LED”

El motivo por el cual, en la actualidad, estamos rodeados por iluminación “LED” se basa en la *ELECTROLUMINISCENCIA*, este fenómeno fue descubierto por el ingeniero Henry Joseph Round en 1907, quien intentando mejorar la amplificación de las señales de radio experimentó que ciertos semiconductores, al ser atravesados por una corriente eléctrica, emitían luz.

A pesar de dicho descubrimiento, no fue hasta 1994 cuando los investigadores japoneses Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura, Premios Nobel de Física en 2014, trabajaban en la nucleación cristalina del Nitruro de Galio sobre sustratos de zafiro, obteniendo así el dopaje tipo-p con dicho material y dando lugar al primer LED azul de alta luminosidad, color en el que están basados los diodos que iluminan todo lo que nos rodea en la actualidad.

Previo al LED de color azul, ya existían de color rojo o verde, su uso estaba destinado a calculadoras o pequeñas luces indicadoras de estado en dispositivos de uso diario como la televisión o la radio.

Poco después del hallazgo, en 1995, se consiguió la combinación de los tres colores primarios, rojo, verde y azul, lo cuál dio como resultado la percepción por el ojo humano del color blanco.

También se desarrolló el color blanco tal y como lo tenemos implantado en nuestras vidas como el conjunto de LED azul de alta intensidad con una capa de fósforo, la cual absorbe parte de la forma de onda de la luz azul y genera luz amarilla por fluorescencia. Como apreciamos en la [figura 1](#)

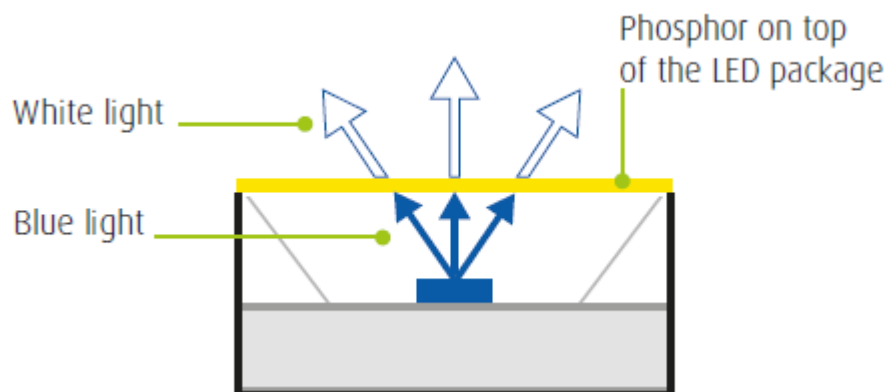


Figura 1. Chip led azul con fósforo [1]

En el sector del automóvil, la iluminación LED está cada vez más demandada por los fabricantes. Por su capacidad para adaptarse a los diseños, por el rango de visibilidad que aporta a los conductores y por la eficiencia y tamaño frente a los sistemas de iluminación anteriores.

Es tal el desarrollo de los LED que en la actualidad se habla de OLED “Diodo Emisor de Luz Orgánico”, el cuál está basado en el fenómeno de la electroluminiscencia y puede adoptar diferentes formas o ser doblado, como ya se está viendo en el mercado de los móviles, ejemplo de ello es el piloto del Audi A8 que vemos en la [figura 2](#).



Figura 2. Piloto Audi A8 LED y OLED. [2]

La ventaja de los OLED se basa en su construcción, ya que son capas de componentes orgánicos que reaccionan con un estímulo eléctrico y emiten luz, para contener las capas, se utiliza cristal, plástico o algún material con forma de fina capa.

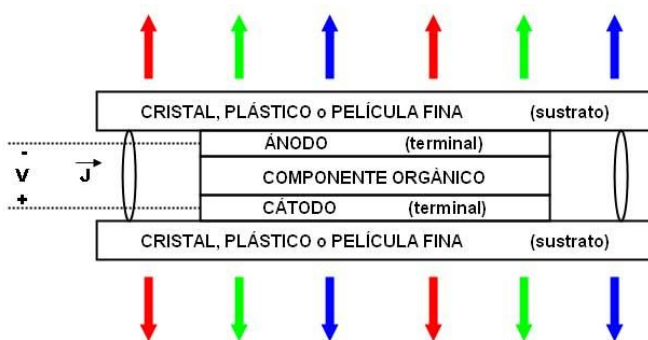


Figura 3. Topología OLED [3]

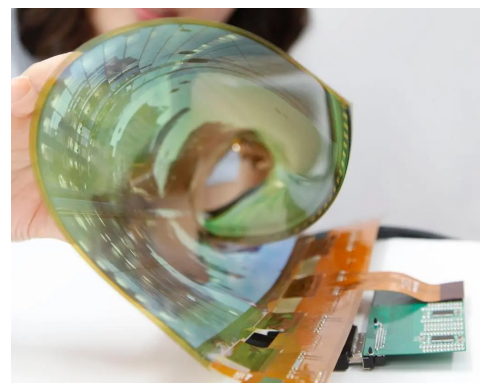


Figura 4. Maleabilidad OLED[4]

1.1. FUNCIONAMIENTO DEL LED

Un diodo tiene dos posiciones:

- A) Polarización inversa, donde no puede circular la corriente, ya que tiene una tensión inversa muy elevada y se destruiría en caso de que ocurra.
- B) Polarización directa, este modo es el que produce luz, ya que tiene una baja tensión de funcionamiento y nos permite el paso de corriente a través de él.

Al aplicar en polarización directa una caída de tensión en los extremos del led, comienza a circular corriente por el led. Cada vez que un electrón con demasiada carga negativa está en la región N adquiere energía para poder sobrepasar la resistencia que le ofrece la diferencia de potencial eléctrico, la atraviesa y se combina con un hueco positivo de los sobrantes en la región P. En el mismo instante que ocurre esa combinación, la energía de sobra que adquirió el electrón para poder atravesar la diferencia de potencial, se transforma en energía electromagnética, que se libera en forma de fotón y a su vez de luz visible.

La corriente que circula por el LED está relacionada con la corriente de saturación y la tensión con la que es alimentado por la siguiente ecuación:

$$I_F = I_S \left(e^{\frac{V_F}{KT}} - 1 \right) \quad [1]$$

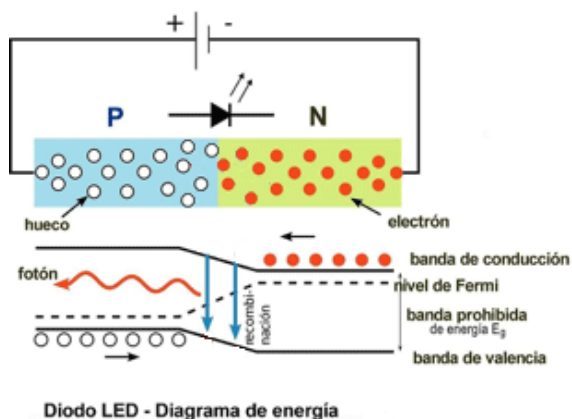
I_S es la corriente de saturación inversa

I_F es la corriente del led

T es la temperatura de unión absoluta

K denota Constante de Boltzmann

e representa carga de electrones



Animación 1. Polarización directa LED [5]

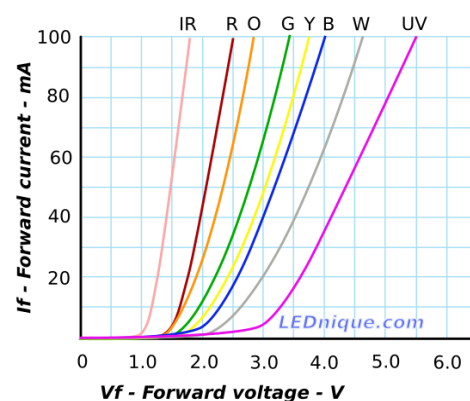


Figura 5. Curva V-I LED por colores [6]

1.2. COMPOSICIÓN DEL LED

Como ya se ha nombrado con anterioridad, el LED está formado principalmente por una unión P-N de un material semiconductor, según el material semiconductor que del que el dispositivo esté formado, presentará una longitud de onda diferente y por consecuencia, emitirá un color en particular.

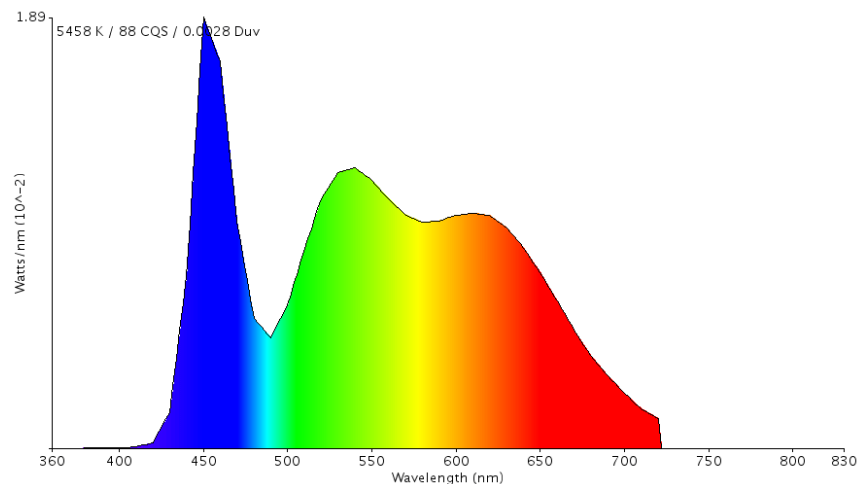


Figura 6. Espectro longitudes de onda. [7]

Color	Longitud de Onda λ [nm]	Diferencia de potencial [ΔV]	Material semiconductor
Rojo	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	(AlGaAs) (GaAsP) (AlGaInP)
Naranja	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	(GaAsP) (AlGaInP) (GaP)
Amarillo	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	(GaAsP) (AlGaInP) (GaP)
Verde	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	(GaP) (AlGaInP) (AlGaP) (InGaN) (GaN)
Azul	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	(ZnSe) (InGaN) (SiC)
Violeta	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	(InGaN)
Blanco	Esp. amplio	$2.8 < \Delta V < 4.2$	Led azul o UV con fósforo amarillo

Tabla 1. Colores, longitud de onda, diferencia de potencial y materiales semiconductores

Arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs)	Arseniuro de Galio (GaAs)
Nitruro de aluminio-galio-indio (AlGaInN)	Fosfuro de galio y arsénico (GaAsP)
Fosfuro de aluminio-galio-indio (AlGaInP)	Nitruro de galio (GaN)
Nitruro de galio-aluminio (AlGaN)	Fosfato de galio (GaP)
Fosfuro de galio-aluminio (AlGaP)	Nitruro de galio-indio (InGaN)
Nitruro de aluminio (AlN)	Carburo de silicio (SiC)
Nitruro de boro (BN)	Seleniuro de zinc (ZnSe)

Tabla 2. Materiales semiconductores y su fórmula molecular

Como se refleja en la gráfica, los distintos colores tienen distintas tensiones a las que se obtiene su corriente nominal y ello se debe a la composición del semiconductor.

Los LED, disipan calor debido a la corriente que circula por ellos, si la temperatura no es bien disipada éstos pueden perder rendimiento o incluso destruirse por exceso de temperatura. Para ello es necesario que estén situados sobre una superficie que facilite la transmisión del calor al ambiente o el contenedor en el que esté situado.

Hay diferentes opciones, tales como placas de aluminio o bien disipadores exclusivos para los LED.



Figura 7. LED con disipador [8]

2. EVOLUCIÓN DE LA ILUMINACIÓN DEL AUTOMÓVIL

El origen de la iluminación cuando se fabricó el primer automóvil fue con candiles o velas como es el caso del Ford T ([Figura 8](#)), debido a la velocidad de éstos vehículos, era suficiente luminancia la aportada por la vela.

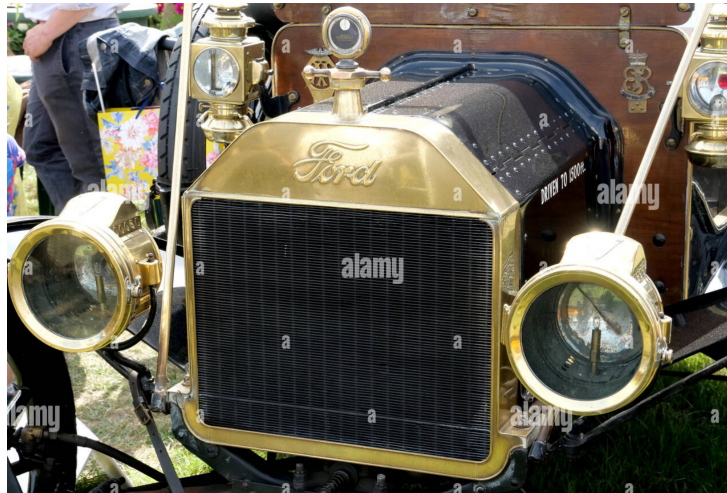


Figura 8. Faros Ford T [9]

Transcurridos los años, se pasó a una bombilla halógena y el cristal del faro era estriado ([Figura 9](#)) para cumplir con la normativa en la forma de corte de la luz.



Figura 9. Faro Philips halógeno con cristal estriado [10]

Como continuación a dichas bombillas los coches empezaron a equipar bombillas H4 o H7, también halógenas pero con un desarrollo previo para que su duración en el automóvil fuese mayor. Son formadas por gas halógeno y el filamento de tungsteno, los cuales producen una reacción regenerativa donde los depósitos evaporados de tungsteno vuelven al filamento, manteniendo un cristal limpio sin depósitos para una luminosidad más eficiente. (Figura 10 y 11)

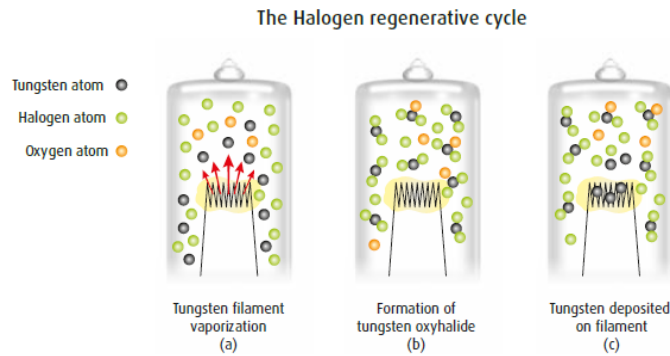


Figura 10. Ciclo regeneración halógeno [1]

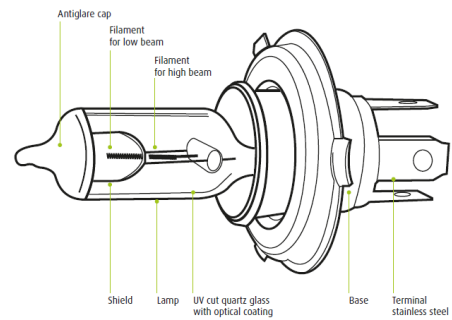


Figura 11. Lámpara H4 [1]

El predecesor del halógeno fue el Xenon, éstas lámparas funcionan por descarga de gas, generando un arco eléctrico que es quien emite la luz dentro del tubo donde se contiene.

Éste tipo no contiene un filamento como si que lo había en las lámparas halógenas, el arco de luz es creado entre dos electrodos dentro de un cristal de cuarzo relleno de una mezcla de gases nobles y sales de halogenuros metálicos.

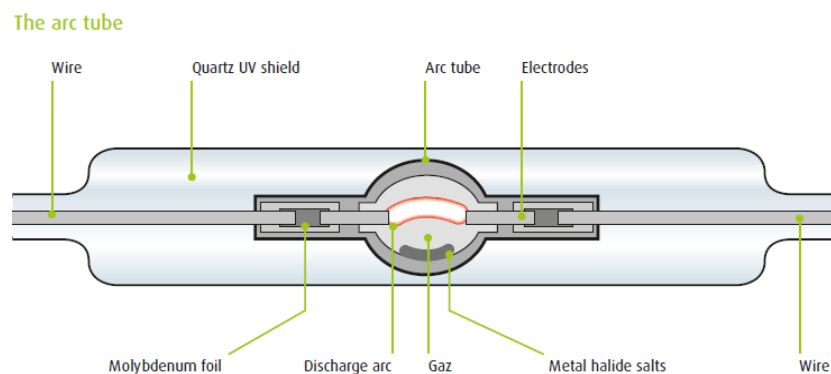


Figura 12. Esquema lámpara Xenon [1]

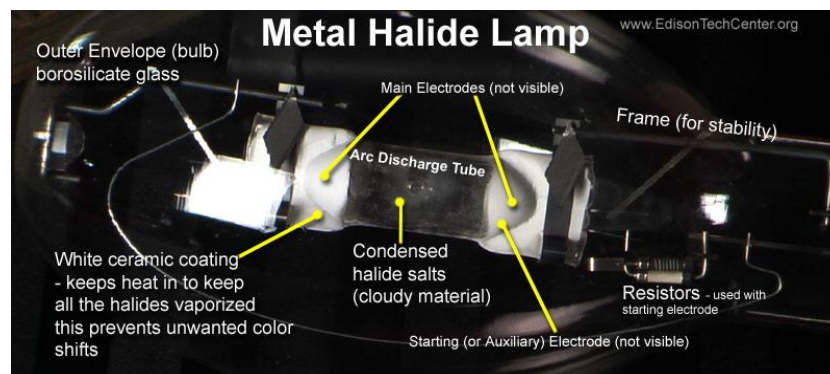


Figura 13. Lámpara Xenon real [11]

El último tipo de iluminación, que es el más utilizado en la actualidad es el LED y el tema que nos acontece para este trabajo.

Ya hemos hablado anteriormente de cómo funciona el LED pero no hemos mostrado su vista al microscopio. El LED como es conocido por todos no es como tal, sino que es el conjunto del chip donde se encuentra el semiconductor, los hilos para hacer el conexionado eléctrico, un empaquetado para hacer de protección mecánica y difusión óptica además de una interfaz térmica para eliminar el calor.

Evolución de un emisor de Fosforo de aluminio-galio-indio (AlGaInP) en una extracción altamente eficiente, si vemos en la [tabla 1](#), equivale al color rojo.

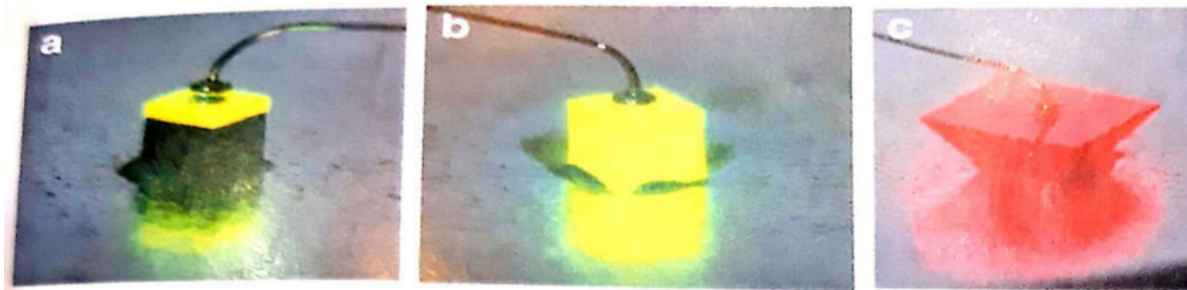


Figura 14a. Capa de GaP con el sustrato absorbente GaAs [12]

Figura 14b. Diodo con capa gruesa y sustrato transparente [12]

Figura 14c. Arquitectura de chip TIP. [12]

Hay diferentes métodos de tratar el LED para iluminar con él, bien por reflexión (figura 15), guías masivas de luz (figura 16) o a través de lentes (figura 17).



Figura 15. Ejemplo proyector con reflexión. Audi Q4 e-tron. [13]



Figura 16. Ejemplo guía masiva. [14]



Figura 17. Ejemplo módulo con lente. [15]

Una de las grandes diferencias entre los 3 principales tipos de iluminación es la temperatura de color de los mismo, desde el color rojo o luz cálida, hasta la luz azul o luz fría. En la figura 18 encontramos un diagrama que relaciona el color con la temperatura.

Las luces halógenas están clasificadas como luces cálidas, esta temperatura está orientada para lugares acogedores, al contrario que la luz fría, la cual es utilizada en lugares oscuros o donde hay un alto movimiento de paso.

Un ejemplo de luz cálida es el empleado para la iluminación de una casa, donde la luz transmite descanso y desconexión, sin embargo, una luz fría se utiliza en

oficinas u hospitales para que el personal laboral no se relaje y permanezca activo en su trabajo.

La gráfica de la figura 19 compara la temperatura de los tres sistemas de iluminación (Halógeno, Xenon y LED) en un diagrama de cromaticidad que es usado para determinar las coordenadas del color.

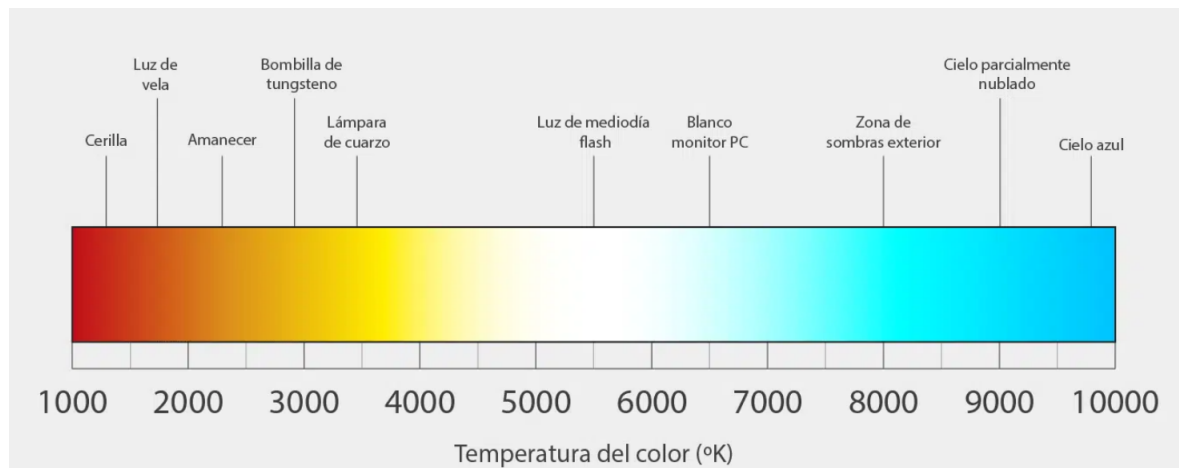


Figura 18. Diagrama temperatura del color [1]

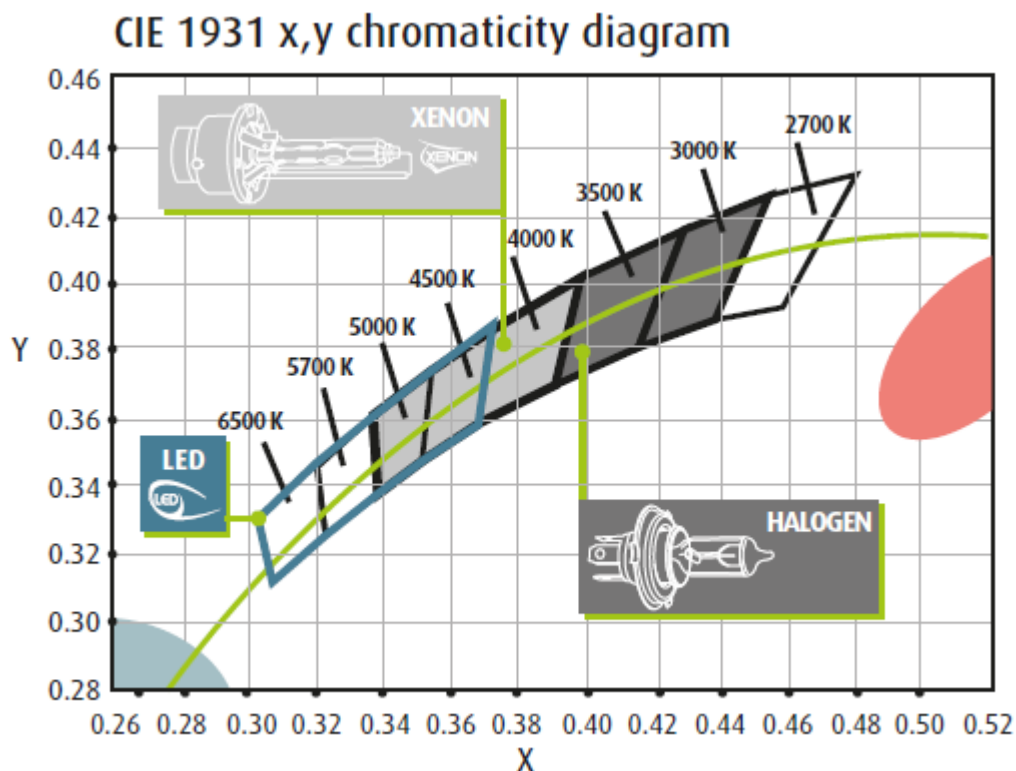


Figura 19. Comparativa temperatura color LED, Xenón y Halógeno [1]

La otra gran diferencia debido a la potencia de cada sistema y su rendimiento es el alcance que obtiene cada tipo de iluminación en carretera, el LED llega a tener hasta 5 veces más de alcance que un sistema halógeno, muestra de ello la figura 20.

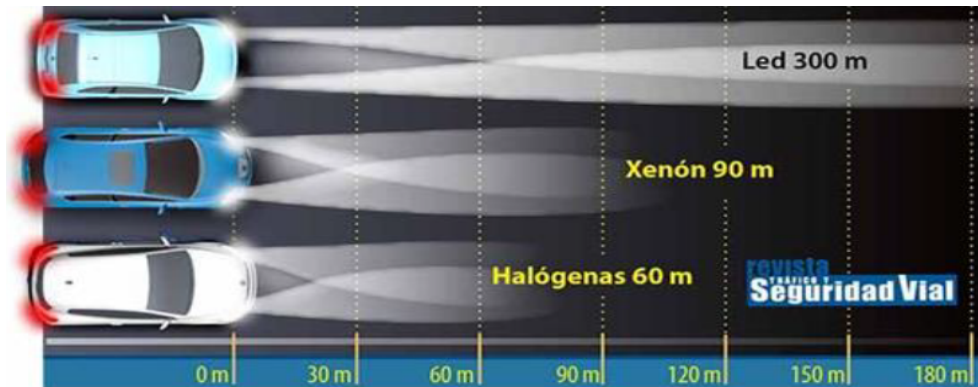


Figura 20. Comparativa alcance de sistemas de iluminación[16]

Aunque la mejor manera de comparar el alcance de cada uno de ellos es con la curva isolux, la cual marca la forma de la luz, su expansión y su alcance:

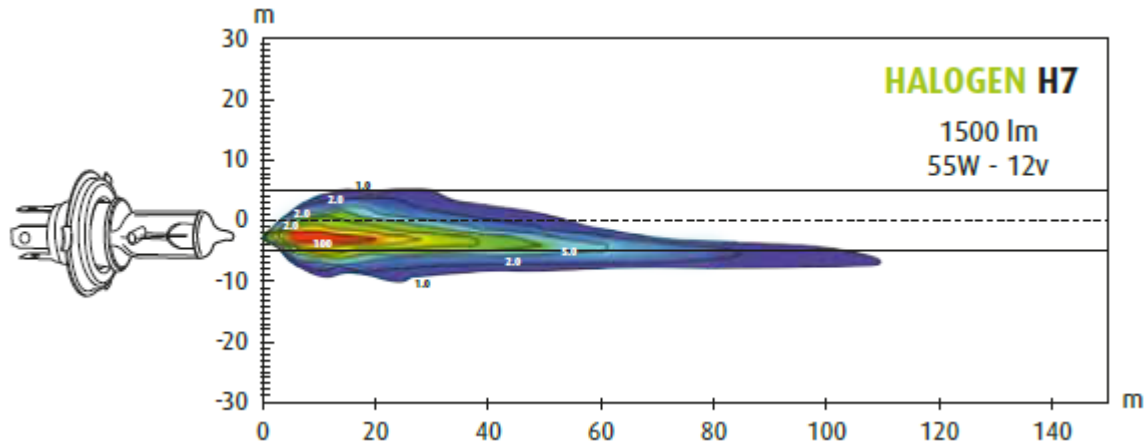


Figura 21. Curva Isolux halógeno [1]

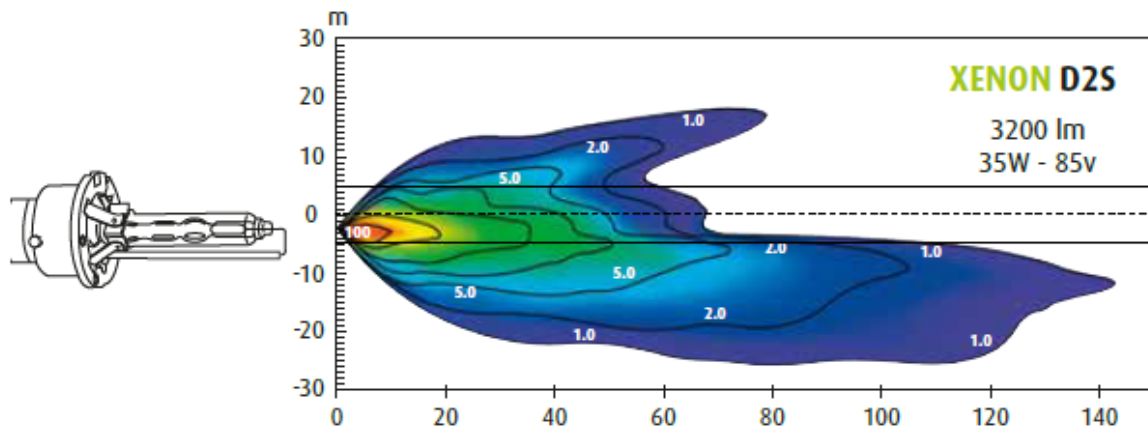


Figura 22. Curva Isolux Xenón [1]

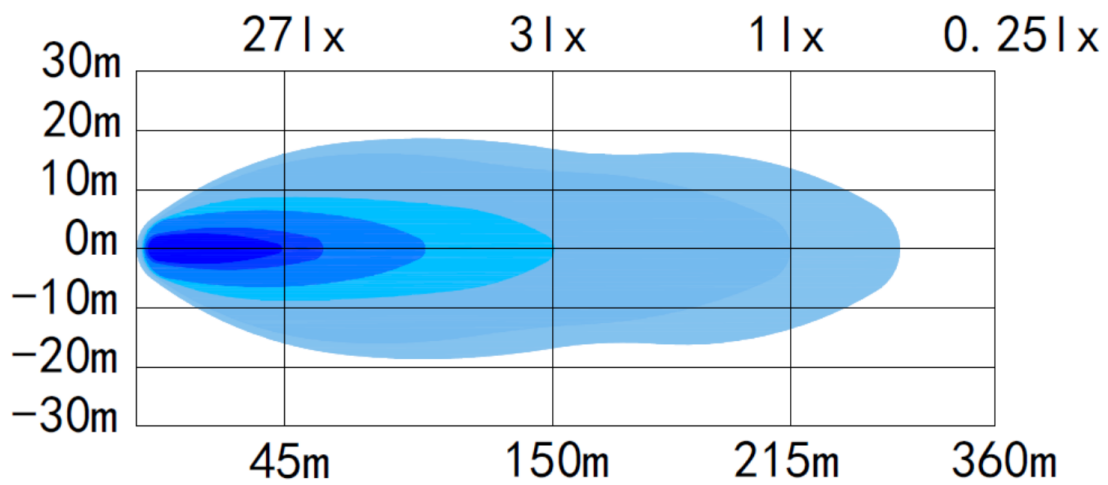


Figura 23. Curva Isolux LED 30W [17]

3. TIPOS DE LED

Esta clasificación distingue los leds según sus características físicas y por el uso al que están destinados por las mismas. Pues cada uno aporta soluciones a necesidades específicas.

3.1. TIPOS DE LED POR SU ENCAPSULADO

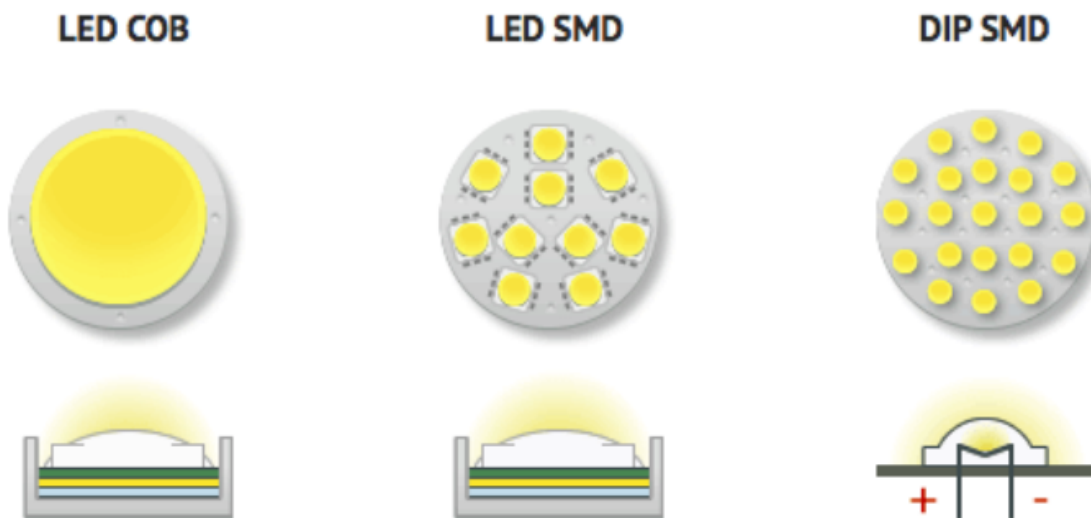


Figura 24. Encapsulados LED [18]

- **COB (Chip On Board)** Contiene un alto número de diodos en su interior, todos del mismo color y forman un solo circuito, está fijado permanentemente a la placa.
- **SMD (Surface Mounted Device)** Un solo LED puede contener un máximo de 3 diodos, éstos pueden ser de diferentes colores (RGB) para formar cualquier color variando su alimentación. En función del número de diodos que contenga, el dispositivo albergará el mismo número de circuitos internos e independientes y con ello el doble de patillas que de diodos, cada circuito tiene su ánodo y su cátodo.
- **DIP (Dual In-line Package)** Este encapsulado es necesario para poder pinchar en placas de ensayo o a través de agujeros en la PCB. También pueden contener hasta 3 diodos en su interior para formar diferentes colores.

3.2. TIPOS DE LED POR SU POTENCIA

La potencia, como producto de tensión por intensidad que circula por el LED, significa mayor luminosidad, siempre que estemos en rangos nominales sin exceder los límites.

Podemos distinguirlos en 3 grupos:

- **Señalización:** Pequeños dispositivos que alcanzan hasta los 30mW y su principal uso es en paneles de mandos o indicadores del salpicadero.
- **Media potencia:** Desde los 30mW hasta 1W, se usan para iluminación interior como luces de lectura.
- **Potencia:** Aquellos que superan 1W, uso mayoritariamente para iluminación

3.3. TIPOS DE LED POR SU LONGITUD DE ONDA

Según la luz requerida en cada uso se pueden clasificar los leds.

Espectro visible: perceptibles por el ojo humano, se utiliza en los casos en que queremos mostrar un color concreto, forman las luces que nos alumbran durante toda nuestra vida

Espectro invisible: No perceptibles por el ojo humano, por debajo de los 400 y por encima de los 750 nanómetros, las ondas en este espectro son utilizadas para comunicaciones, como son los infrarrojos o con fines médicos los rayos ultravioletas.

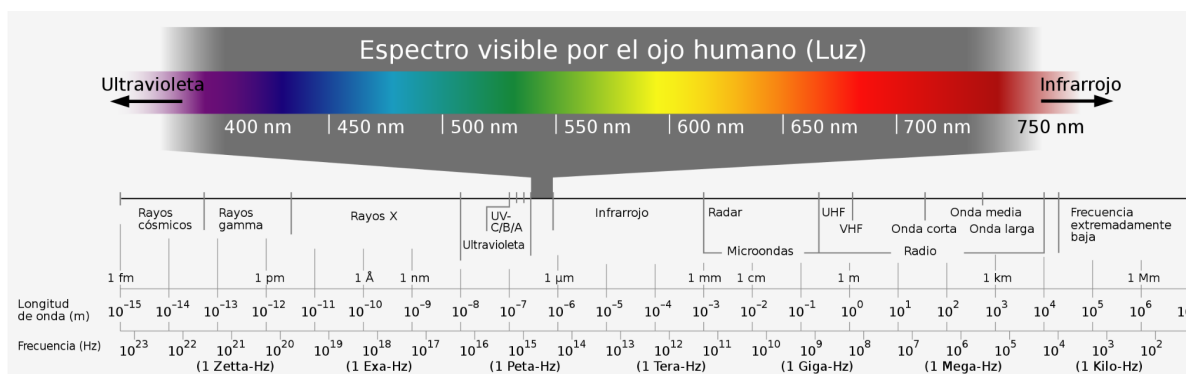


Figura 25. Longitudes de onda y sus usos[19]

4. FUNDAMENTOS DE LA ILUMINACIÓN

4.1. ILUMINACIÓN EN EL AUTOMÓVIL

4.1.1. INTENSIDAD LUMÍNICA

Su unidad de medida es la candela (cd) y su símbolo es I , viene definida como la energía luminosa desde una fuente de luz en una determinada dirección.

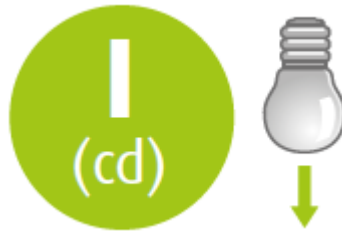


Figura 26. Intensidad luminica [1]

La intensidad luminica varía dependiendo en qué dirección sea vista la fuente de luz, ejemplo de ello, la siguiente figura que representa un perfil de emisión y es apreciable como la intensidad varía desde las 140cd a 20° hasta las 70cd a 90° en una bombilla.

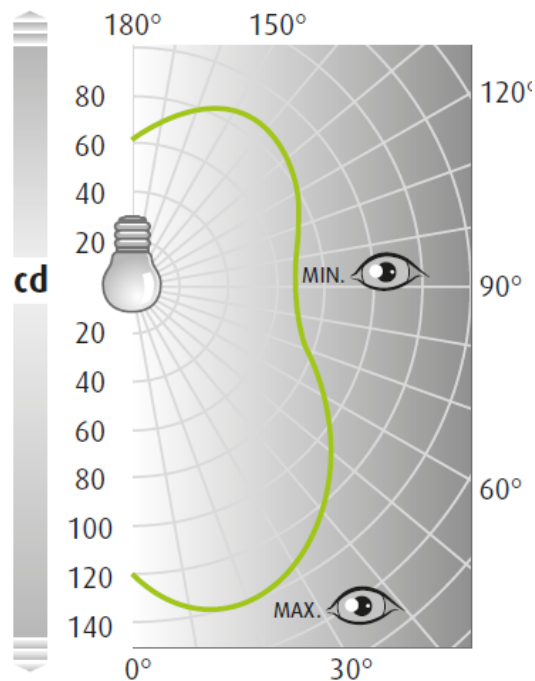


Figura 27. Intensidad vs Ángulo de visión [1]

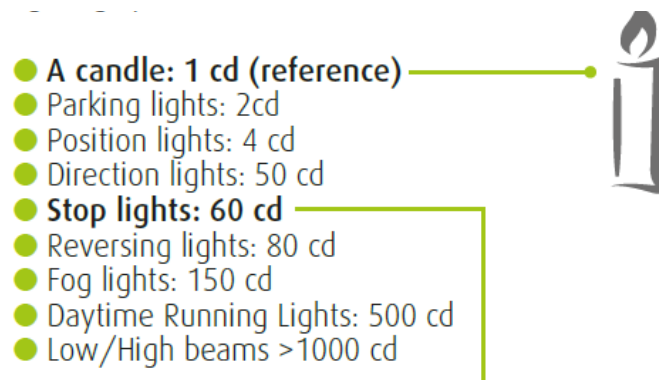


Figura 28. Candelas para diferentes funciones del automóvil [1]



Figura 29. Tail light y Stop (brake) light de VW Tiguan[20]

La figura 29 representa la función luz de posición trasera y la luz de freno, ésta última con mayor intensidad lumínica que la prima, lo cual puede apreciarse ya que se encienden segmentos del piloto que no estaban anteriormente.

4.1.2. FLUJO LUMINOSO

Su unidad de medida es el Lumen (lm) y su símbolo es F, viene definida como toda la luz radiada por una fuente.



Figura 30. Flujo luminoso[1]

El Lumen está basado en la curva de visión del ojo humano. La siguiente figura muestra como el ojo humano percibe la luz según el color, en rojo la curva límite de visión del ojo.

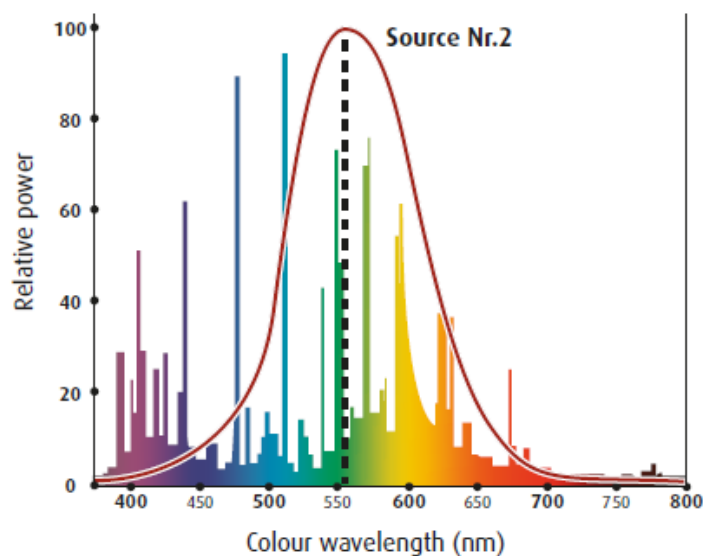


Figura 31. Picos de color que son percibidos por el ojo humano [1]

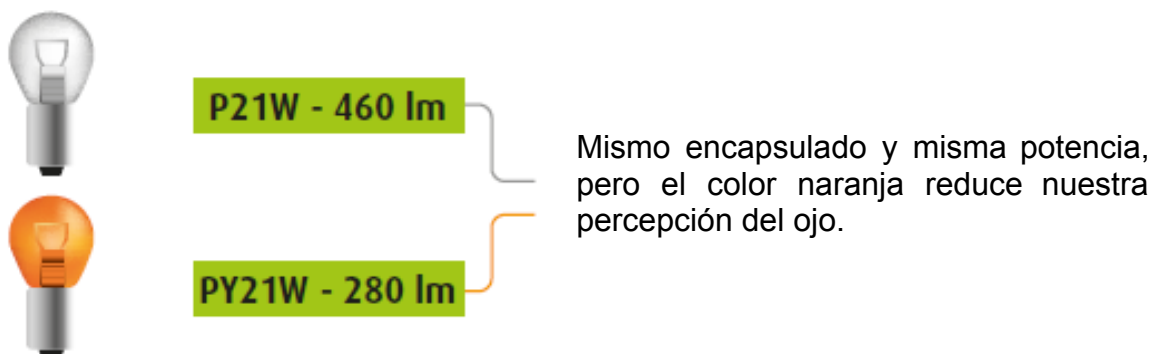


Figura 32. Diferencias en luminosidad [1]

4.1.3. ILUMINANCIA

Su unidad de medida es el lumen por metro cuadrado o LUX y su símbolo E. La iluminancia es llamada al flujo luminoso que cae en una unidad de superficie.

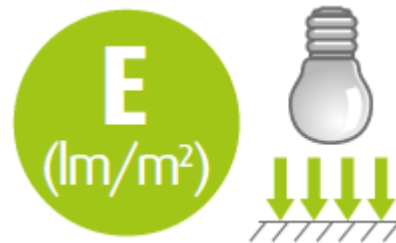


Figura 33. Iluminancia [1]

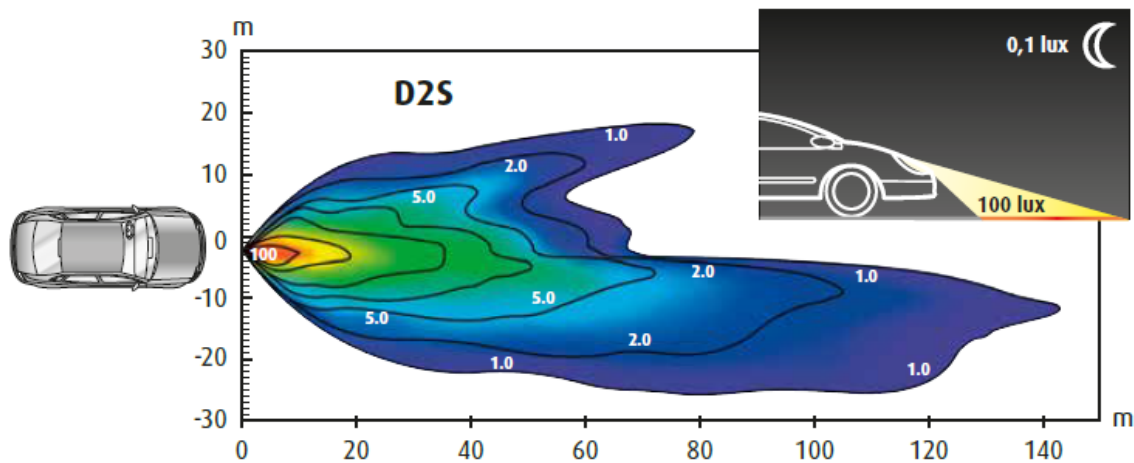


Figura 34. Iluminancia de un faro Xenón [1]

Los niveles de iluminancia en la carretera son especificados según un estándar automovilístico, depende del tipo de fuente de luz, halógena, Xenón o LED.

El nivel de iluminancia no tiene en cuenta la cantidad de luz reflejada en la superficie, dicha luz reflejada es llamada luminancia, la cual depende del tipo de superficie y el color de la misma.

4.1.4. LUMINANCIA

Su unidad de medida es la candela por metro cuadrado y su símbolo L. La luminancia mide la luz reflejada de una superficie a una dirección determinada, la superficie puede ser emisora de luz por sí misma, transmisora o reflectora de cualquier fuente.

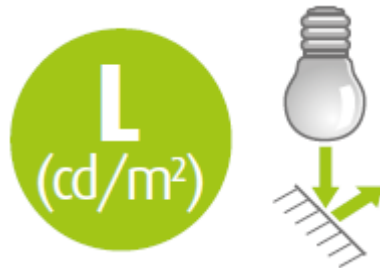


Figura 35. Luminancia [1]

$$L = \frac{I}{S}$$

400 to 1200 cd

Max. luminance: 480000 cd/m²
Min. luminance: 20000 cd/m²

25 to 200 cm²

Figura 36. Luminancia para un DRL [1]

Para la luz diurna, la norma ECE R87 especifica una superficie aparente entre 25 y 200 cm² y unos niveles de intensidad entre 400 y 1200 cd.

Entonces, la luminancia que tendremos para un DRL (daytime running light) será la reflejada en la [figura 36](#).

PARA VER Y SER VISTOS

Las funciones para las que se desarrollan las luces en un coche son señalar e iluminar, la primera consiste en señalar cualquier maniobra que haga el coche y avisar de la presencia del mismo durante la noche, la segunda consta de tres funciones marcadas, luces de cruce, de ruta y marcha atrás, todas ellas para ayudar al conductor a ver lo que hay a su alrededor durante la noche.

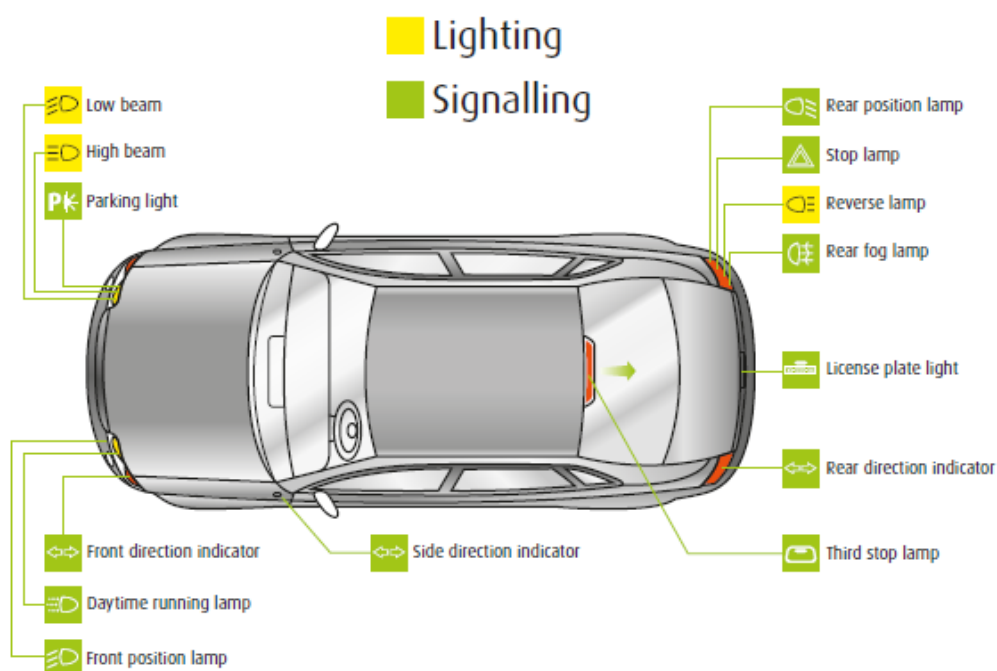


Figura 37. Funciones de iluminación y señalización[1]

Todas ellas están regladas por normativa según país y función, un ejemplo es la siguiente tabla con la reglamentación europea. Donde R representa "Regulation" seguida del número que la relaciona con tu función. Todas ellas pueden encontrarse en internet.

European Commission regulations for lighting system are classified as follows:

R37	LIGHT SOURCES - FILAMENT LAMPS
R99	LIGHT SOURCES - HID LAMPS
R112	LOW AND HIGH BEAMS - FOR HALOGEN LAMPS AND LED SOURCES
R98	LOW AND HIGH BEAMS - HID LAMP SOURCES
R19	BEAMS - FRONT FOG LAMPS
R87	DAYTIME RUNNING LAMPS
R48	SETUP ON THE CAR
R123	AFS BEAMS - HALOGEN, XENON AND LED LIGHT SOURCES

Figura 38. Normativas para Iluminación en Europa[1]

4.1.5. ILUMINACIÓN

Haciendo una breve parada sobre la iluminación, la cual presenta mayor complejidad en su diseño, ésta está compuesta por 3 tipos de luces LB (Low Beam), HB (High Beam) y Fog, en español y como las hemos aprendido en la autoescuela son: Luces de cruce, Luces de carretera y Luces antiniebla.

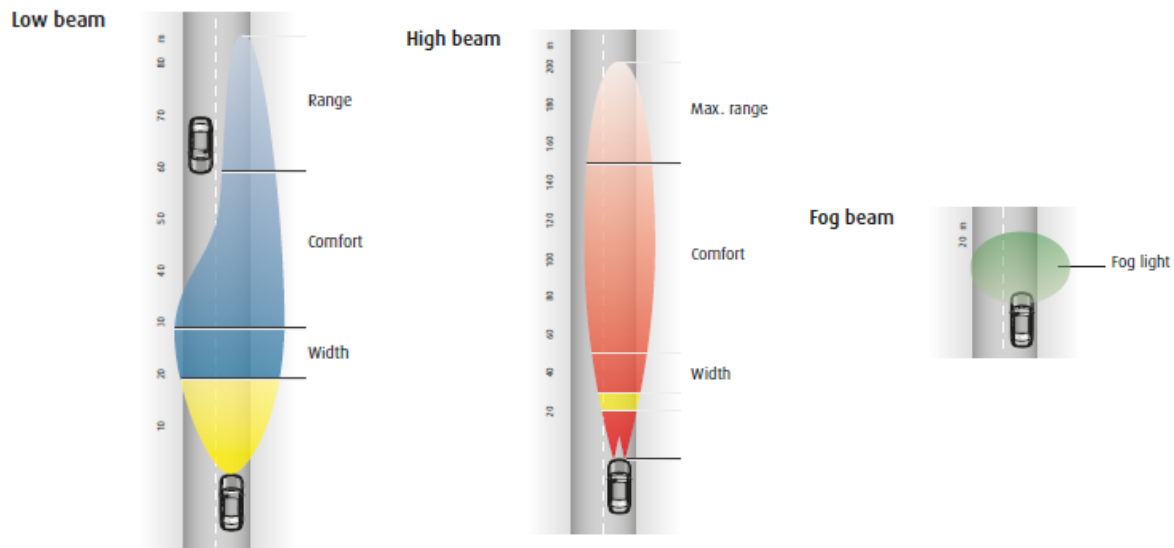


Figura 39. Formas de luz según función [1]

Las luces de cruce presentan una determinada forma, su objetivo es evitar el deslumbramiento de los conductores que circulen en dirección contraria o delante tuya, de ahí la parte plana (Flat) de la siguiente imagen, el ángulo llamado Kink en el mundo de la automoción, tiene que respetar una inclinación de 15° y su objetivo es iluminar los exteriores de la calzada y las señales que en ella hay. Tiene un rango de confort entre los 30m y 60m pero puede alcanzar la luz a distancias superiores a los 60m.

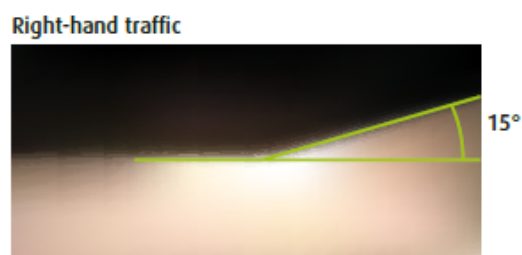


Figura 40. Forma de corte LB [1]

Para la luz de carretera, no tiene un corte especial como el caso anterior, pero si tiene que cumplir unos valores de intensidad (candelas) y está centrada en la calzada. Su rango de confort está entre 50m y 150m, pero puede llegar a distancias mayores.

Y por último el antiniebla, para momentos de baja visibilidad, éstos tiene que proveer al vehículo de una barra de luz a todo lo ancho con un corte nítido y un rango no superior a 25m, dotando de una mejor visión de los obstáculos cercanos al conductor.

5. DRIVERS LED

En este apartado aprenderemos sobre los convertidores de continua - continua, circuitos electrónicos de potencias que convierten una tensión continua en otro nivel de tensión continua y con una señal regulada, circuitos en los que están basados los controladores LED, según si son lineales o conmutados y sus características.

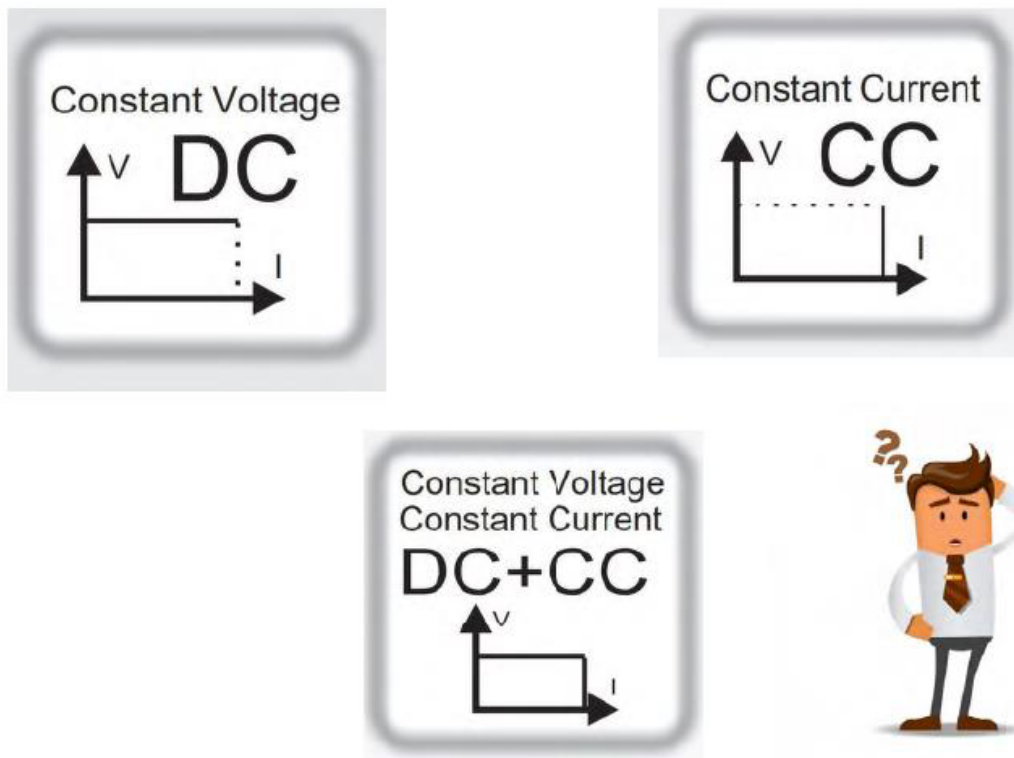


Figura 41. Diferentes tipos de driver [12]

Para alimentar a los LED es muy importante la estabilidad de la señal proporcionada por la fuente y la corriente que circula por el mismo. Según el LED tendremos que distinguir el driver que lo alimenta según su salida.

Los drivers de voltaje constante convierten la tensión a la tensión de trabajo de los LEDs, los cuales son excitados por corriente continua para su funcionamiento.

Los drivers de corriente constante convierten la tensión de entrada, ofreciendo una corriente constante a la salida, son los más utilizados en el control led.

Los drivers de corriente y voltaje constante, son una mezcla de los anteriores y los más completos, otorgando mayor protección al LED, tienen un uso más específico.

Se destacan dos tipos, reguladores lineales y reguladores conmutados.

5.1. REGULADORES LINEALES

Los drivers lineales son los más básicos y aportan al LED una corriente constante independientemente del voltaje de entrada. El voltaje de salida se encontrará entre 0 y V_S , pero nunca podrá ser superior a V_S .

La manera más sencilla es con una resistencia o un transistor que igualmente actúa como una resistencia variable y su regulación es más sencilla introduciendo una corriente por la patilla de base, además evita cambios en la corriente producidos por variaciones de voltaje en la entrada.

Se denomina regulador lineal porque el transistor opera en la región lineal, en lugar de la región de saturación o corte.

Se puede observar que es una forma muy sencilla de convertir un voltaje a otro menor, pero tiene un inconveniente y es su rendimiento, muy bajo pues toda la potencia que no cae en la carga es consumida por el regulador.

En casos de poca potencia absorbida por la carga, el excedente lo asume el transistor o la resistencia y genera pérdidas por el exceso de potencia además de calentar el componente.

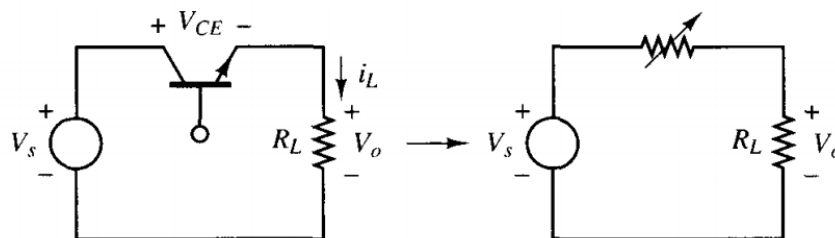


Figura 42. Regulador lineal básico.[21]

Se pueden clasificar según la salida que aportan:

- Voltaje constante o reguladores de tensión: El diseño del sistema le permite mantener un voltaje constante a la salida, aunque se produzcan variaciones en la tensión de alimentación.
- Corriente constante o reguladores de corriente: Este sistema nos permite controlar o mantener una intensidad constante a la salida y eliminar las variaciones de la entrada.

Para el control de los diodos LED necesitamos mantener una corriente constante, ya que la luminosidad del mismo es proporcional a la intensidad que circula por él, por consiguiente necesitamos regular la intensidad.

Los drivers lineales de corriente constante son los más utilizados por los ingenieros en la industria automotriz al cumplir fácilmente las necesidades tanto técnicas como económicas que se les exige.

Entre las necesidades técnicas podemos destacar la temperatura, la necesidad de un amplio rango, pues un coche debe pasar pruebas térmicas muy restrictivas, ya que un coche se comercializa en países muy cálidos como Arabia Saudita que puede alcanzar los 54°C en verano o tan fríos como Finlandia con temperaturas en invierno de hasta -40°C, eso hace una diferencia térmica de más de 94°C.

La electrónica de un sistema de iluminación tiene que pasar pruebas a temperaturas de 120°C y -40°C para simular las situaciones más extremas en las cuales podría encontrarse.

Además, en los vehículos que funcionan de 12 V a 14 V se le puede sacar un buen rendimiento a los drivers lineales, pues el voltaje de entrada y el necesario en la salida son muy cercanos, dando rendimientos muy buenos, del 60% al 70%, aunque siempre por debajo de los drivers conmutados que como veremos después son más complejos, pero aportan un mayor rendimiento.

5.2. REGULADORES CONMUTADOS

Una alternativa más eficiente sería el convertidor conmutado. Como el anterior se basaría en un transistor, pero en vez de operar la región lineal, se alterna entre corte y saturación, como si de un interruptor se tratase. Esto produce que la energía disipada por el regulador sea menor que en los reguladores lineales, proporcionando un mejor rendimiento.

Suponiendo que la salida es igual a la entrada con el interruptor cerrado y 0 en abierto, siendo los mismo periódicos, producen una señal de salida de pulsos con una componente continua de salida:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_o D \quad [2]$$

Como se puede observar la componente continua viene determinada por el ciclo de trabajo (D), que a su vez se calcula:

$$D = \frac{t_{conducción}}{t_{conducción} + t_{corte}} = \frac{t_{conducción}}{T} = t_{conducción} * f \quad [3]$$

Siendo f , la frecuencia de conmutación en hercios.

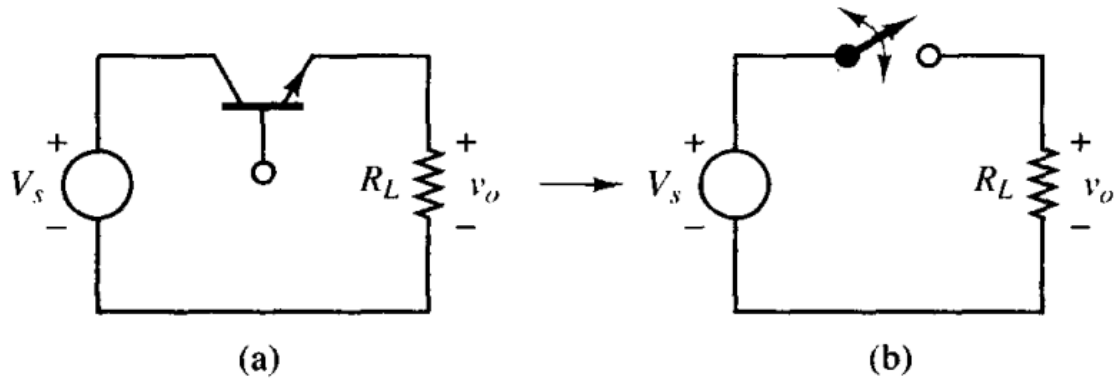


Figura 43. (a) Convertidor CC-CC básico conmutado. (b) Equivalente para conmutación.[21]

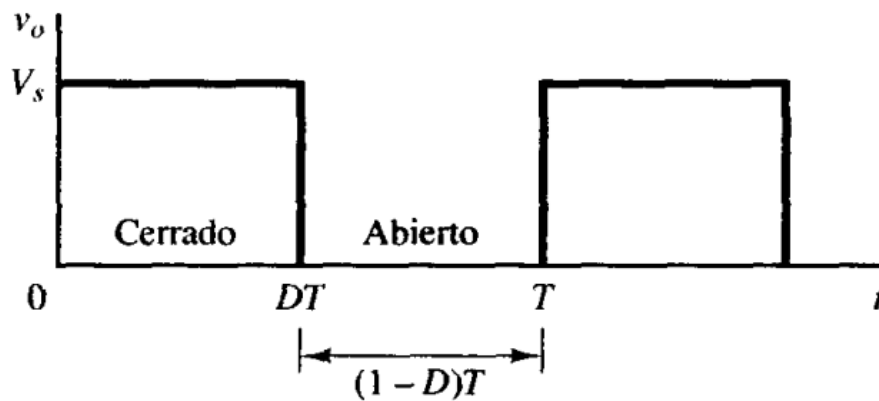


Figura 44. Tensión de salida. [21]

La potencia absorbida por el interruptor ideal es cero. Cuando el interruptor está abierto, no pasa corriente por él; cuando el interruptor está cerrado, no cae tensión en el mismo. Por tanto, la carga absorbe toda la potencia y la eficiencia de energía es del 100%. En un interruptor real se producirán pérdidas, porque la tensión del interruptor no será cero cuando conduzca y el interruptor deberá pasar por la región lineal al pasar de un estado a otro.

5.2.1. CONVERTIDOR REDUCTOR

En ocasiones, con una señal de salida como la [Figura 44](#), compuesta por pulsos es suficiente, pero muchas veces el objetivo es producir una salida que sea continua pura. La manera para conseguir una salida continua es haciendo un filtrado paso bajo de la señal con una bobina y un condensador, filtro L-C, añadido al convertidor.

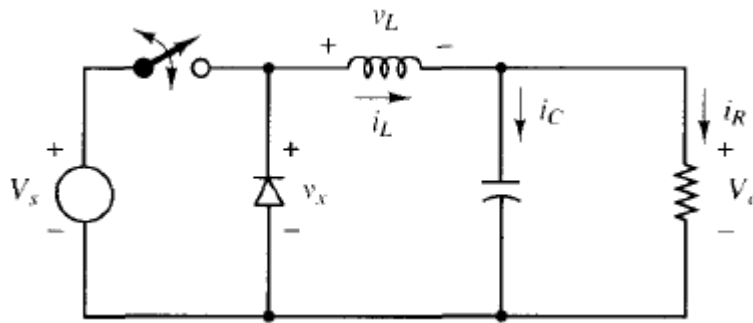


Figura 45. Convertidor CC-CC Reductor.[21]

El diodo proporciona un camino a la corriente de la bobina cuando el interruptor está abierto y se polariza en inversa cuando el interruptor está cerrado. Dicho circuito es un convertidor reductor puesto que la salida es inferior a la entrada

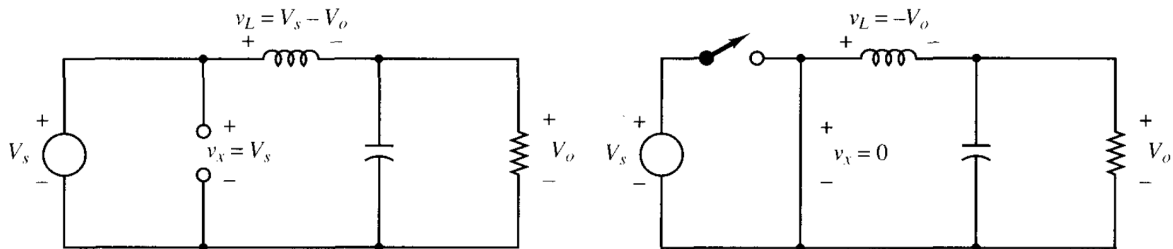


Figura 46. Circuitos equivalente a interruptor cerrado y abierto.[21]

Para analizar el circuito y siempre que esté en interruptor abierto, el diodo estará polarizado en directa y corriente positiva por la bobina.

La corriente por la bobina puede darse como permanente o discontinua, la última es aquella en la cuál, la corriente pasa por cero en cada periodo.

Para diseñar el filtro y analizar los circuitos se hará analizando la tensión y corriente que circula por la bobina.

Propiedades del convertidor reductor en régimen permanente:

- Corriente periódica en la bobina:

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad [4]$$

- La tensión media en la bobina es cero:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad [5]$$

- La corriente media en el condensador es cero:

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0 \quad [6]$$

- La potencia entregada por la fuente es igual a la suministrada por la carga. Si los componentes no son ideales:

$$\begin{aligned} P_S &= P_O \text{ (Ideal)} \\ P_S &= P_O + \text{pérdidas (No Ideal)} \end{aligned} \quad [7]$$

Para analizar el convertidor reductor, comenzamos suponiendo:

- El circuito opera en régimen permanente.
- La corriente en la bobina es permanente (siempre positiva).
- El valor del condensador es muy grande y la tensión de salida se mantiene constante a una tensión V . Más adelante obviaremos esta restricción para mostrar los efectos de una capacitancia finita.
- El periodo de conmutación es T ; el interruptor estará cerrado un tiempo DT y estará abierto el resto del tiempo, $(1 - D)T$.
- Los componentes son ideales.

La clave del análisis para determinar la salida V , es examinar, en primer lugar, la corriente y la tensión en la bobina cuando el interruptor está cerrado y luego con el interruptor abierto. La variación neta de corriente en la bobina en un periodo debe ser cero en régimen permanente. La tensión media en la bobina es cero.

Análisis para interruptor cerrado: Diodo polarizado en inversa.

La tensión en la bobina es:

$$v_L = V_S - V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad [7]$$

Si reorganizamos los términos:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (\text{conmutador cerrado})$$

Siendo la derivada una constante positiva, la corriente aumenta linealmente como se vé en la [Figura 49\(a\)](#). La variación de corriente a interruptor cerrado se calcula:

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_S - V_O}{L} \right) DT$$

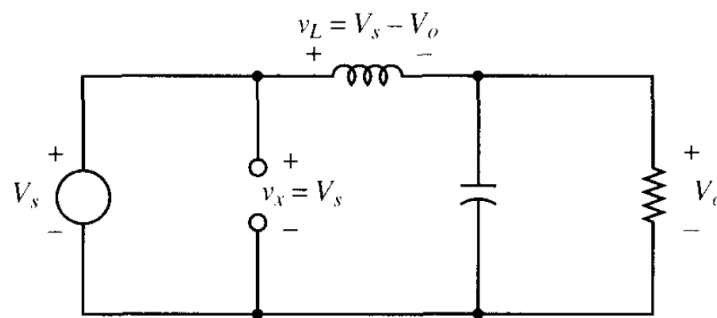


Figura 47. Circuito equivalente a interruptor cerrado[21]

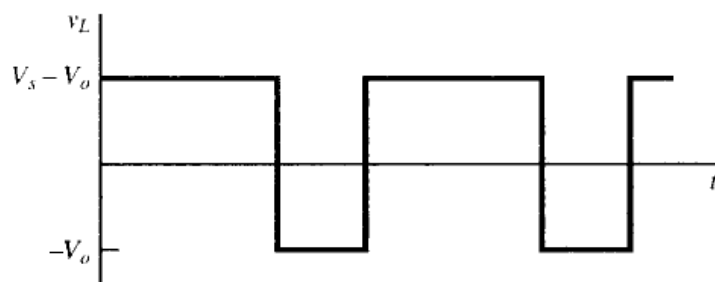


Figura 48. Tensión en la bobina [21]

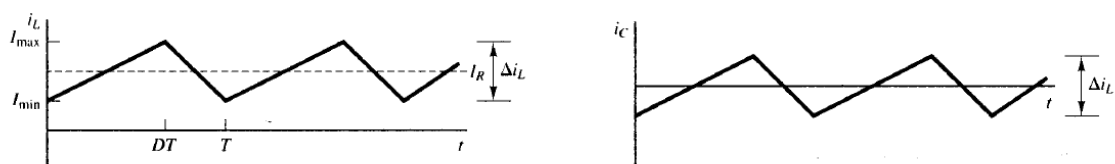


Figura 49. (a) Corriente en la bobina. (b) Corriente en el condensador [21]

Análisis con el interruptor abierto: Cuando el interruptor está abierto, el diodo se polariza en directa para dejar pasar la corriente de la bobina tal como se aprecia en el circuito equivalente. Cuando el interruptor está abierto, la tensión en la bobina es:

$$v_L = -V_o \quad [8]$$

Si reorganizamos los términos:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (\text{interruptor abierto})$$

La derivada de la corriente en la bobina es una constante negativa, y la corriente disminuye linealmente como se muestra en la [Figura 49\(a\)](#), para el período $-V_o$. La variación de corriente en la bobina cuando el interruptor está abierto es:

$$(\Delta i_L)_{abierto} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad [9]$$

Para régimen permanente, la corriente de la bobina tiene que ser la misma al inicio y al final del ciclo de conmutación, así pues, la variación total por la bobina será cero.

$$(\Delta i_L)_{Cerrado} + (\Delta i_L)_{abierto} = 0 \quad [10]$$

O lo que es lo mismo:

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad [11]$$

Despejando V_o :

$$V_o = V_s D \quad [12]$$

Observe que la tensión de salida sólo depende de la entrada y del ciclo de trabajo D . Si la tensión de entrada fluctúa, la tensión de salida puede regularse ajustando el ciclo de trabajo adecuadamente, para ello se precisa un bucle de realimentación para muestrear la tensión de salida, compararla con una referencia y configurar correctamente el ciclo de trabajo del conmutador. Más adelante se hará mención de los bucles de realimentación.

La corriente media en la bobina debe ser igual a la corriente media en la resistencia de carga, porque la corriente media en el condensador debe ser nula cuando opera en régimen permanente:

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad [13]$$

Los valores mínimo y máximo de la corriente en la bobina se calcularán de la siguiente manera:

$$I_{M\acute{A}X} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = V_o \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2LF} \right) \quad [14]$$

$$I_{M\acute{A}X} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = V_o \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2LF} \right) \quad [15]$$

Para que la corriente por la bobina sea permanente, se tiene que cumplir que la corriente mínima que circula por ella sea mayor que 0. Con motivo de las ecuaciones anteriores y mantener una corriente permanente hay que calcular el valor mínimo de inductancia para que la corriente no sea negativa:

$$I_{MIN} = 0 = V_o \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2LF} \right)$$

$$L_{min} > \frac{(1-D)R}{2F} \quad [16]$$

Siendo el valor de inductancia siempre mayor al valor mínimo, nunca debería darse una corriente discontinua.

- Rizado de la tensión de salida

En el análisis anterior hemos supuesto que el condensador era muy grande para que la tensión de salida fuese constante. En la práctica no será posible mantener perfectamente constante la tensión de salida con una capacidad finita. La variación periódica de la tensión de salida, o rizado, se calcula a partir de la relación entre la tensión y la corriente del condensador. La corriente en el condensador es:

$$i_C = i_L - i_R$$

La corriente que circula por el condensador presenta la siguiente forma:

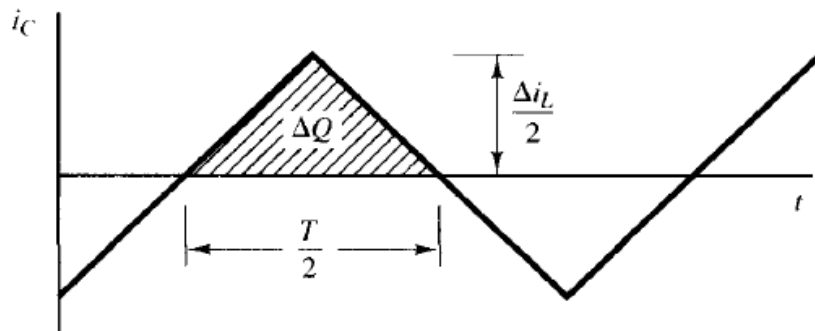


Figura 50. Corriente en el condensador [21]

El condensador se cargará mientras sea positiva la corriente en el mismo. Según como se define la capacidad, podemos decir:

$$Q = CV_o \rightarrow c\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{c} \quad [17]$$

Siendo la variación de la carga el área del triángulo sobre el eje de tiempo:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta i_L}{2} \rightarrow \Delta Q = \frac{T\Delta i_L}{8} \quad [18]$$

Siendo la variación de la carga un octavo del periodo por la variación de la corriente en la bobina, siendo su análisis en circuito abierto, el resultado de la variación de la tensión de salida será:

$$(\Delta i_L)_{abierto} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T ; \Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C} \quad [19]$$

$$\Delta V_o = \frac{T}{8C}\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D) \quad [20]$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8CLf^2} \quad [21]$$

Si el rizado es muy grande la suposición de que la salida es constante es razonable y el análisis anterior será válido.

5.2.2. CONVERTIDOR ELEVADOR

Este convertidor conmutado funciona abriendo y cerrando, al igual que el reductor, un interruptor electrónico periódicamente. Su nombre es otorgado pues la tensión de salida es mayor que la de entrada.

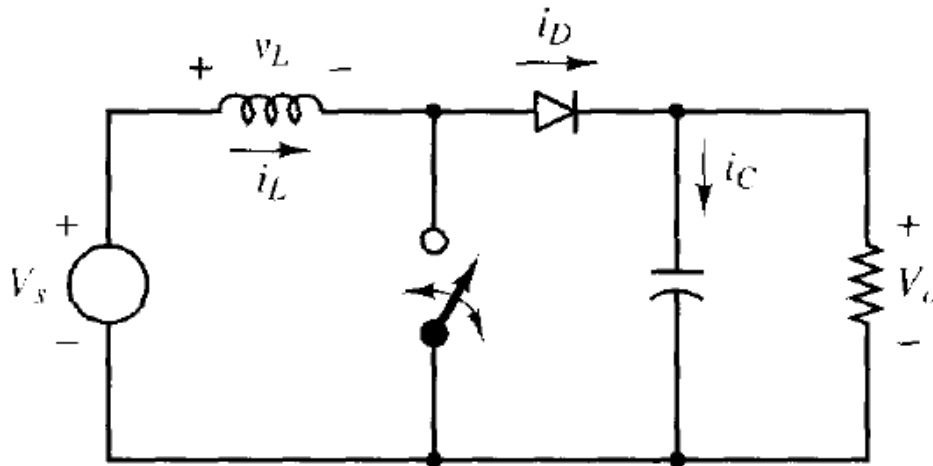


Figura 51. Circuito convertidor elevador. [21]

Al igual que para el convertidor reductor, se realizan una suposiciones para analizar el circuito, entre ellas:

- El circuito opera en régimen permanente.
- El periodo de conmutación es T y el interruptor está cerrado un tiempo DT y está abierto el resto del tiempo, $(1-D)T$.
- La corriente en la bobina es permanente (siempre positiva).
- El condensador es muy grande y la tensión de salida se mantiene constante y su valor es V .
- Los componentes son ideales.

Análisis para interruptor cerrado: Cuando el interruptor está cerrado, el diodo está polarizado en inversa y aplicando las leyes de Kirchhoff, las tensiones de malla incluyendo la fuente y la bobina es:

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad [22]$$

El ritmo de variación de la corriente es una constante, así pues, la corriente aumenta linealmente cuando el interruptor está cerrado, la variación de la corriente quedaría expresada como:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad [23]$$

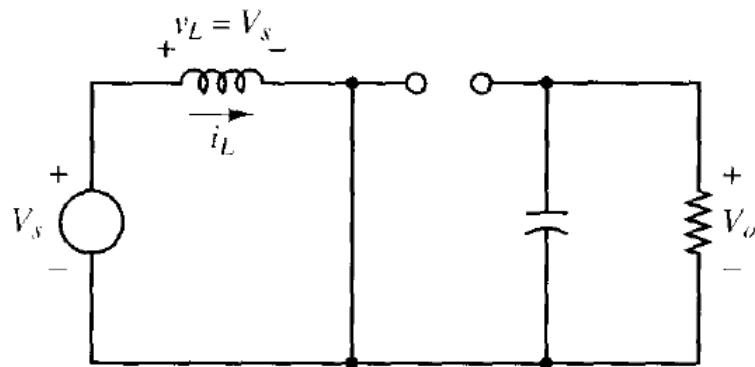


Figura 52. Circuito equivalente con el interruptor cerrado [21]

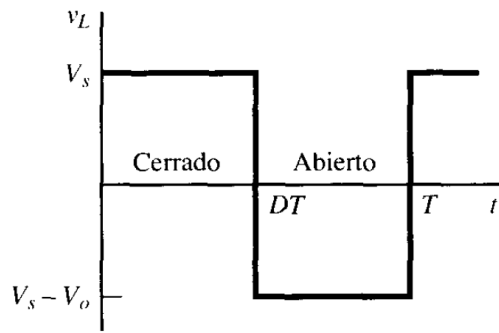


Figura 53. Tensión en la bobina [21]

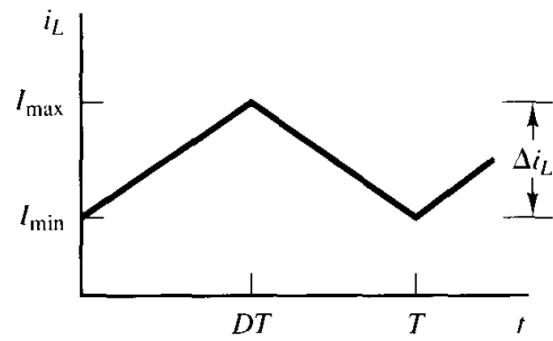


Figura 54. Corriente en la bobina [21]

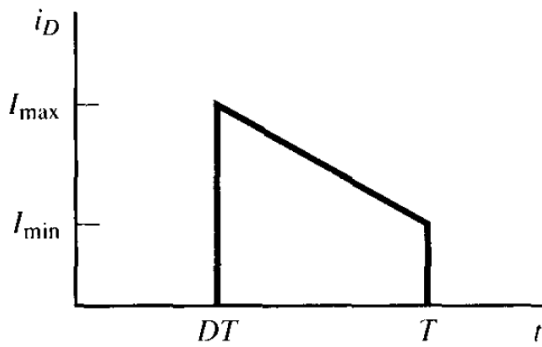


Figura 55. Corriente en el diodo [21]

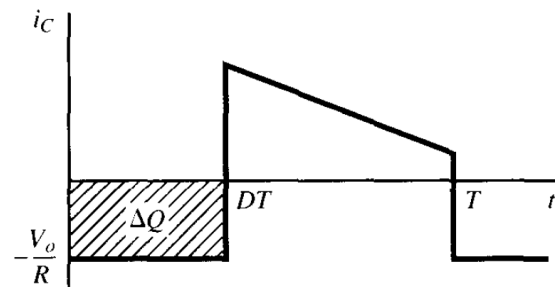


Figura 56. Corriente en el condensador [21]

$$\left(\Delta i_L\right)_{\text{cerrado}} = \frac{V_s DT}{L} \quad [24]$$

Análisis para interruptor abierto: Cuando el interruptor está abierto, la corriente en la bobina no puede variar de forma instantánea, por lo que el diodo se polariza en directa para proporcionar un camino a la corriente de la bobina. Suponiendo que la tensión de salida es cte, la tensión en la bobina es:

$$v_L = V_S - V_o = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_o}{L} \quad [25]$$

El ritmo de variación de corriente en la bobina es una constante, por lo que la corriente debe variar linealmente cuando el interruptor está abierto. La variación en la corriente de la bobina con el interruptor abierto es:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_S - V_o}{L} \quad [26]$$

Y despejando Δi_L ,

$$(\Delta i_L)_{abierto} = \frac{(V_S - V_o)(1-D)T}{L} \quad [27]$$

En régimen permanente, la variación neta de la corriente de la bobina debe ser igual a cero. Es decir, la variación entre circuito cerrado y circuito abierto debe ser cero:

$$(\Delta i_L)_{cerrado} - (\Delta i_L)_{abierto} = 0 \quad [28]$$

$$\frac{V_S DT}{L} - \frac{(V_S - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad [29]$$

Siendo V_o ,

$$V_S(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0 \quad [30]$$

$$V_o = \frac{V_S}{(1-D)} \quad [31]$$

Además, la tensión media en la bobina debe ser cero cuando el convertidor opera en régimen permanente. La expresión de la tensión media en la bobina es un periodo de conmutación es:

$$V_L = V_S D + (V_S - V_o)(1 - D) = 0 \quad [32]$$

La ecuación 31 muestra que, si el interruptor siempre está abierto y D es cero, la salida es igual a la entrada. Al aumentar el ciclo de trabajo, el denominador de la ecuación disminuirá y la salida será mayor que la entrada. El convertidor elevador produce una tensión de salida mayor o igual a la tensión de entrada. Sin embargo, la salida no puede ser menor que la entrada, como sucedía con el convertidor reductor.

Cuando el ciclo de trabajo del interruptor se aproxime a la unidad, la salida se hará infinita, de acuerdo con la ecuación. Sin embargo, ésta se basa en componentes ideales. Los componentes reales, que producen pérdidas, impedirán que la salida se haga infinita. como vamos a demostrar a continuación.

La corriente media en la bobina se calculará teniendo en cuenta que la potencia entregada por la fuente debe ser igual a la potencia absorbida por la resistencia de carga. La potencia de salida es:

$$P_O = \frac{V_o^2}{R} \quad [33]$$

Y la potencia de entrada es $V_s I_s = V_s I_L$. Igualando la potencia de entrada y la potencia de la salida con la ecuación 33:

$$V_s I_L = \frac{\left(\frac{V_s}{(1-D)}\right)^2}{R} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2 R} \quad [34]$$

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad [35]$$

Las corrientes máximas y mínimas en la bobina se determinan usando el valor medio y la variación de corriente:

$$I_{MAX} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s D T}{2L} \quad [36]$$

$$I_{MIN} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L} \quad [37]$$

Todo el cálculo se ha desarrollado suponiendo que la corriente en la bobina era permanente y siempre positiva. Para que dicho caso sea real es necesario que la corriente mínima de la bobina (I_{MIN}) sea positiva. El límite se calcula igualando a cero el valor de la corriente mínima.

$$I_{MIN} = 0 = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s D T}{2L}$$

$$I_{MIN} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad [38]$$

Rizado de la tensión de salida

Todos los cálculos anteriores, al igual que con el convertidor reductor, se han desarrollado asumiendo la tensión de salida constante, así que la capacidad del condensador también lo era, pero en la realidad los dispositivos no son ideales,

tienen una capacidad finita que generará una fluctuación o rizado en la tensión de salida.

El rizado de la tensión de pico a pico puede calcularse con la forma de onda de la corriente del condensador, con su variación de carga:

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT = C \Delta V_o \quad [39]$$

Despejando la variación de la tensión o el rizado:

$$\Delta V_o = \frac{V_o D}{RCf} \rightarrow \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad [40]$$

5.2.3. CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR

Otro convertidor básico en modo conmutado es el convertidor reductor-elevador, que se muestra en la figura abajo situada. La salida del convertidor puede ser mayor o menor que la tensión de entrada.

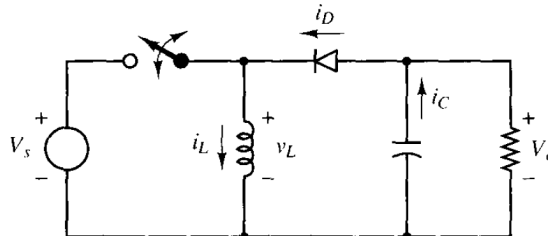


Figura 57. Esquema circuito reductor-elevador [21]

Relaciones entre tensión y corriente

Se realizan las siguientes suposiciones acerca del modo de operación del convertidor:

- El circuito opera en régimen permanente.
- La corriente en la bobina es permanente.
- El condensador es lo suficientemente grande como para suponer una tensión de salida constante.
- El interruptor está cerrado un tiempo DT y abierto el resto del tiempo $(1-D)T$
- Los componentes son ideales.

Análisis a interruptor cerrado

Cuando el interruptor está cerrado, la tensión en la bobina es:

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad [41]$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es una constante, por lo que la corriente en la misma aumenta linealmente. Podemos expresar la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad [42]$$

Dando como resultado la variación de corriente a interruptor cerrado:

$$\Delta i_{L_{CERRADO}} = \frac{V_s DT}{L} \quad [43]$$

Análisis a interruptor abierto

Cuando el interruptor está abierto, la corriente en la bobina no puede variar instantáneamente, por lo que el diodo estará polarizado en directa y pasará corriente por la resistencia y el condensador. Cuando se da esta condición, la tensión en la bobina es:

$$v_L = V_o = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad [44]$$

El ritmo de variación de la corriente en la bobina es de nuevo constante, y la variación de la corriente es:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_o}{L} \rightarrow \Delta i_{L_{ABIERTO}} = \frac{V_o(1-D)T}{L} \quad [45]$$

Cuando el circuito funciona en régimen permanente, la variación neta de la corriente en la bobina debe ser nula en un periodo. Así con los resultados obtenidos para el análisis de interruptor abierto y cerrado, concluimos:

$$\Delta i_{L_{CERRADO}} + \Delta i_{L_{ABIERTO}} = 0 \quad [46]$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{V_o(1-D)T}{L} = 0 \quad [47]$$

Siendo el resultado de V_o :

$$V_o = -V_s \frac{D}{(1-D)} \quad [48]$$

La tensión media en la bobina es cero cuando el convertidor opera en régimen permanente, por lo que:

$$V_L = V_s D + V_o(1 - D) \quad [49]$$

La ecuación 48 muestra que la polaridad de la tensión de salida es opuesta a la de la tensión de la fuente. La magnitud de salida del convertidor reductor-elevador puede ser menor o mayor que la de la fuente, en función del ciclo de trabajo del interruptor. Si $D > 0,5$ la salida será mayor que la entrada, y si $D < 0,5$ la salida será menor que la entrada. Por tanto, este circuito combina las características de los convertidores reductor y elevador. Sin embargo, la inversión de la polaridad en la salida puede ser una desventaja para algunas aplicaciones.

En la figuras que representan la forma de onda de la tensión y la corriente, es apreciable que en el convertidor reductor-elevador, la fuente nunca se conecta a la carga directamente, se almacena la energía en la bobina cuando el interruptor está cerrado y se entrega a la carga cuando está abierto. Por ésto, el convertidor también se denomina convertidor indirecto.

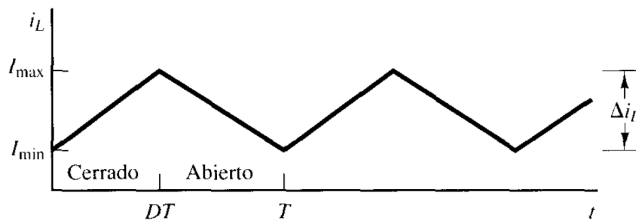


Figura 58. Corriente en la bobina [21]

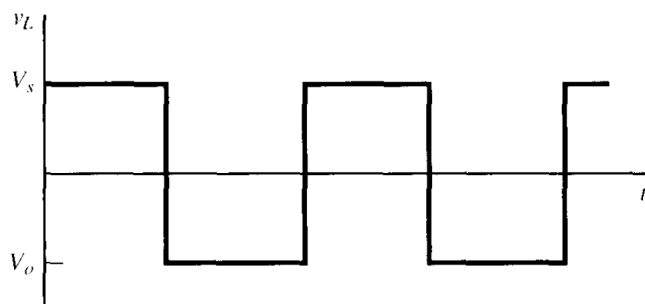


Figura 59. Tensión en la bobina [21]

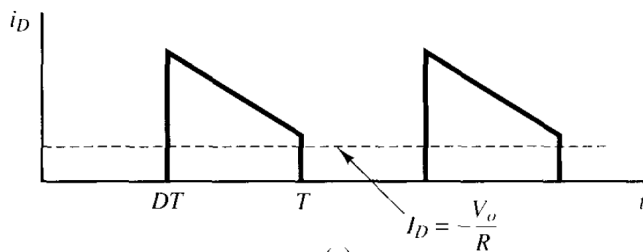


Figura 60. Corriente en el diodo [21]

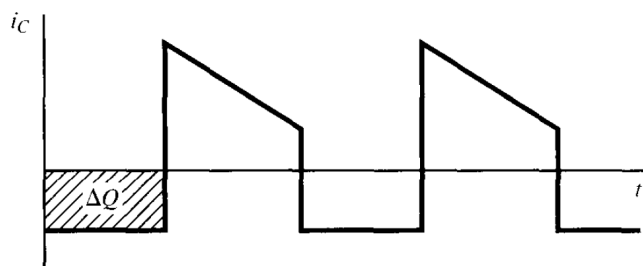


Figura 61. Corriente en el condensador [21]

La potencia absorbida por la carga debe ser igual a la entregada por la fuente, siendo:

$$P_O = \frac{V_o^2}{R}; P_S = V_S I_S \rightarrow \frac{V_o^2}{R} = V_S I_S \quad [50]$$

La corriente media de la fuente se relaciona con la corriente media en la bobina del siguiente modo:

$$I_S = I_L D \quad [51]$$

Como resultado:

$$\frac{V_o^2}{R} = V_S I_L D \quad [52]$$

Sustituyendo V_o y despejando I_L :

$$V_o = -V_S \frac{D}{(1-D)} = 0 ; \frac{V_o^2}{R} = V_S I_L D \quad [53]$$

$$I_L = \frac{V_o^2}{V_S D R} = \frac{P_o}{V_S D} = \frac{V_S D}{R(1-D)^2} \quad [54]$$

Una vez obtenidas las ecuaciones para la corriente de la bobina en interruptor abierto y cerrado, podemos calcular los valores máximos y mínimos de la misma:

$$I_{MAX} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S D}{R(1-D)^2} + \frac{V_S D T}{2L} \quad [55]$$

$$I_{MIN} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S D}{R(1-D)^2} - \frac{V_S D T}{2L} \quad [56]$$

La corriente en la bobina debe ser positiva para tener corriente permanente. Igualando I_{MIN} a cero, se podrá determinar el límite entre la corriente permanente y la discontinua.

$$L_{MIN} = \frac{R(1-D)^2}{2f} \quad [57]$$

Siendo “ f ” la frecuencia de conmutación en hercios.

Rizado de la tensión de salida

El rizado de la tensión de salida del convertidor reductor-elevador se calcula a partir de la forma de onda de la corriente del condensador:

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT = C \Delta V_o \quad [58]$$

Despejando la variación de la tensión de salida ΔV_o :

$$\Delta V_o = \frac{V_o D T}{RC} = \frac{V_o D}{RCf} \rightarrow \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad [59]$$

5.3. EFECTOS NO IDEALES EN EL CONVERTIDOR

5.3.1. CAÍDAS DE TENSIÓN EN LOS INTERRUPTORES

Todos los cálculos realizados previamente han supuesto una idealidad en los interruptores. Tanto los transistores como los diodos presentan caídas de tensión cuando están conduciendo y pueden afectar significativamente al funcionamiento del convertidor, sobre todo cuando se trabaja con tensiones de entrada y salida bajas. Los convertidores, para su diseño, necesitan ser considerados los componentes no ideales. Haciendo una prueba de ello, vamos a analizar el convertidor reductor para demostrar los efectos de las caídas de tensión en los conmutadores.

Basándonos en el análisis del convertidor reductor, las relaciones de tensiones entrada - salida se han determinado utilizando la tensión y la corriente en la bobina. Cuando se producen caídas de tensión diferentes de cero en los interruptores en conducción, la tensión en la bobina con el interruptor cerrado es:

$$v_L = V_S - V_O - V_Q \quad [60]$$

Siendo V_Q la tensión en los bornes del interruptor en conducción. Con el interruptor abierto, la tensión en el diodo y la tensión en la bobina es:

$$v_L = -V_O - V_D \quad [61]$$

La tensión media en la bobina es nula en el periodo de conmutación:

$$V_L = (V_S - V_O - V_Q)D + (-V_O - V_D)(1 - D) \quad [62]$$

Despejando V_O

$$V_O = V_S D - V_Q D - V_D(1 - D) \quad [63]$$

Siendo el resultado menor que para el caso ideal:

$$V_O = V_S D \quad [64]$$

5.3.2. RESISTENCIA DEL CONDENSADOR: EFECTO EN EL RIZADO

Los rizados de la tensión de salida de las para el convertidor reductor se basaban en un condensador ideal. Un condensador real es modelable como una capacidad con una resistencia equivalente serie (ESR) y una inductancia en serie equivalente (ESL). La resistencia equivalente serie puede afectar al rizado de la tensión de salida, produciendo muchas veces un rizado mayor que el debido a la capacidad. La inductancia no influye para frecuencias de conmutación bajas, pero puede ser significativa para frecuencias superiores a unos 300 kHz.

El rizado debido a la resistencia equivalente serie puede aproximarse determinando en primer lugar la corriente en el condensador, suponiendo que éste es ideal. En el convertidor reductor en modo de corriente permanente, la corriente en el condensador, la forma de onda de corriente es triangular. La variación de tensión en la resistencia del condensador es:

$$\Delta V_{o,ESR} = \Delta i_c r_c \quad [65]$$

Para hacer una estimación de las condiciones de peor caso, supondremos que la tensión de rizado pico a pico debida a la resistencia equivalente serie (ESR) se suma algebraicamente al rizado debido a la capacitancia. Sin embargo, los picos de las tensiones de rizado del condensador y de la ESR no coincidirá, por lo que:

$$\Delta V_o < \Delta V_{o,c} + \Delta V_{o,ESR} \quad [66]$$

Donde $\Delta V_{o,c}$ viene dada por la ecuación:

$$\Delta V_o = \frac{V_o(1-D)}{8CLf^2} \quad [67]$$

A menudo, el condensador de salida debe seleccionarse en función de la resistencia serie, en lugar de basarse únicamente en la capacidad.

5.3.3. RESISTENCIA EN LA BOBINA

Las bobinas deben diseñarse de manera que su resistencia interna sea pequeña, que la pérdida de potencia sea mínima y que el rendimiento sea máximo. Para calcular los efectos de la resistencia de la bobina, vamos a usar el convertidor elevador en su funcionamiento para el circuito.

En el caso ideal, la tensión de salida del elevador es:

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad [68]$$

Para investigar el efecto de la resistencia de una bobina en la tensión de salida supondremos que la corriente en la bobina es aproximadamente constante. La corriente de la fuente es igual a la corriente en la bobina y la corriente media en el diodo es igual a la corriente media de carga. La potencia entregada por la fuente debe ser igual a la potencia absorbida por la carga y la resistencia de la bobina, si se desprecian las demás pérdidas:

$$P_s = P_o + P_{r_L} \quad [69]$$

$$V_s I_L = V_o I_D + I_L^2 r_L \quad [70]$$

Siendo r_L la resistencia en serie de la bobina. La corriente en el diodo es igual a la corriente en la bobina cuando el interruptor está cerrado, y es nula cuando el interruptor está abierto. Por tanto, la corriente media en el diodo es:

$$I_D = I_L(1 - D) \quad [71]$$

Sustituyendo el valor de la corriente del diodo

$$V_s I_L = V_o I_L(1 - D) + I_L^2 r_L \quad [72]$$

Lo cual obtiene como resultado:

$$V_s = V_o(1 - D) + I_L r_L \rightarrow I_L = \frac{I_D}{1-D} = \frac{V_o}{R(1-D)} \quad [73]$$

Sustituyendo I_L

$$V_s = V_o(1 - D) + \frac{V_o r_L}{R(1-D)} \quad [74]$$

y despejando V_o :

$$V_o = \left(\frac{V_s}{1-D} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{r_L}{R(1-D)^2}} \right) \quad [75]$$

La ecuación obtenida es similar a la que se obtiene para el convertidor ideal, pero incluye un factor de corrección debido a la resistencia de la bobina.

La resistencia de la bobina también afecta al rendimiento energético de los convertidores. El rendimiento es la relación entre la potencia de salida y la potencia de salida más las pérdidas.

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{\text{pérdidas}}} = \frac{\frac{V_o^2}{R}}{\frac{V_o^2}{R} + I_L^2 r_L} = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{R(1-D)^2}} \quad [76]$$

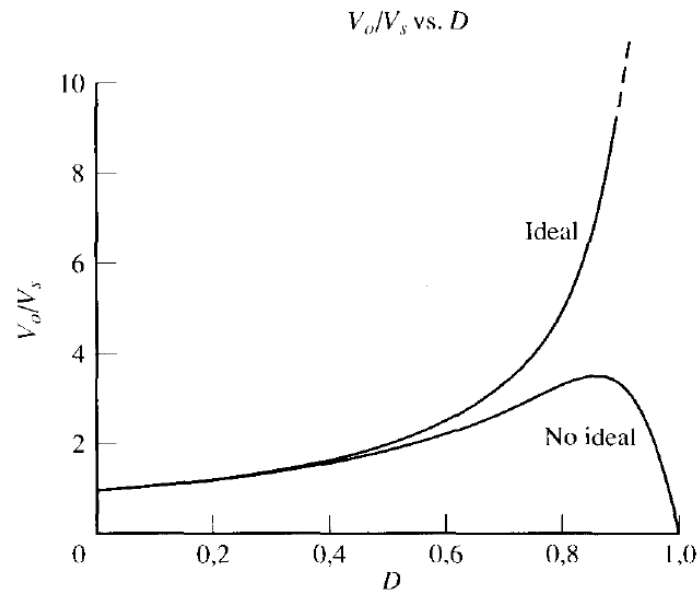


Figura 62. Tensión de salida C. Elevador con bobina no ideal [21]

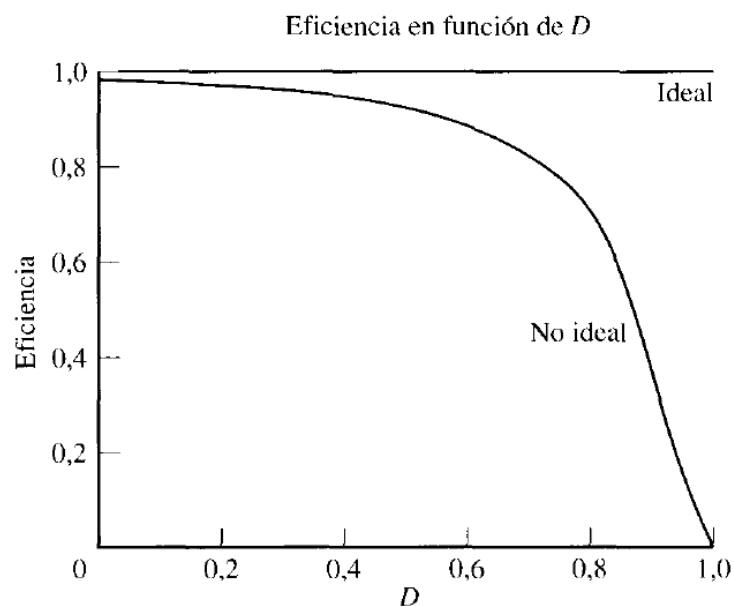


Figura 63. Eficiencia C. Elevador con bobina no idea [21]

5.3.4. PÉRDIDAS DE CONMUTACIÓN

Además de las caídas de tensión y las pérdidas de potencia en conducción, se producen pérdidas adicionales en los interruptores cuando conmutan entre los estados de conducción y corte. En las figuras inferiores, se ilustran las transiciones entre conducción y corte de los interruptores. En este caso, suponemos que las variaciones de tensión y de corriente son lineales y que la secuencia en el tiempo es la mostrada en la figura. En la primera imagen se muestra la potencia instantánea disipada en el interruptor. En la segunda, se muestra otra posible transición entre conducción y corte de un interruptor. En este caso, las transiciones de tensión y corriente no se producen simultáneamente. Esto se aproxima a los procesos de conmutación reales, y la pérdida de potencia provocada por la conmutación es mayor en este caso.

La pérdida de energía en una transición del interruptor es el área situada bajo la curva de potencia. Dado que la potencia media es la energía dividida por el periodo, cuanto más altas son las frecuencias de conmutación, mayores son las pérdidas de conmutación. Una manera de reducir las pérdidas de conmutación es modificar el circuito para que la conmutación se produzca a tensión cero y/o corriente cero.

Tensión, corriente y potencia instantánea del interruptor:

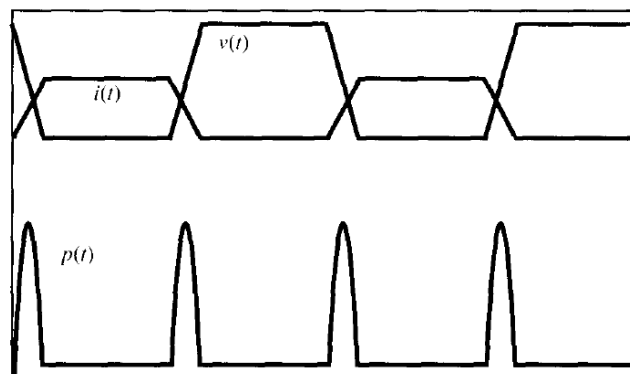


Figura 64. Transición simultánea de V e I. [21]

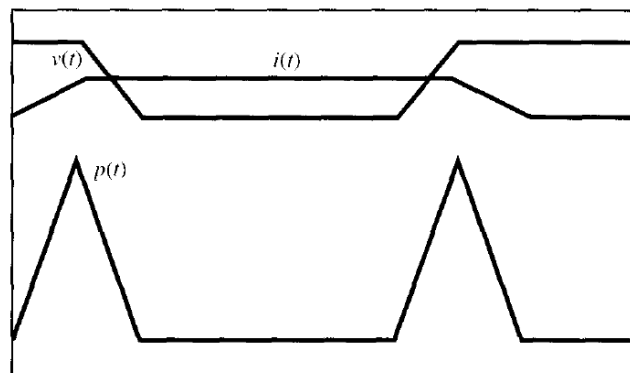


Figura 65. Transición peor caso [21]

5.4. CONTROL DE LA FUENTES DE ALIMENTACIÓN

En los convertidores conmutados continua-continua, nuestro objeto de estudio, la tensión de salida depende de la tensión de entrada y del ciclo de trabajo. En los circuitos reales, como hemos visto en apartados anteriores, los componentes no son ideales y la salida también es función de la corriente de carga.

La salida de la fuente de alimentación, considerando ésta como un convertidor conmutador, es controlada modulando el ciclo de trabajo para compensar las variaciones de la entrada V_s o de la carga. Los sistemas de control realimentados para fuentes de alimentación comparan la tensión de salida con una referencia y convierten el error en un determinado valor de ciclo de trabajo.

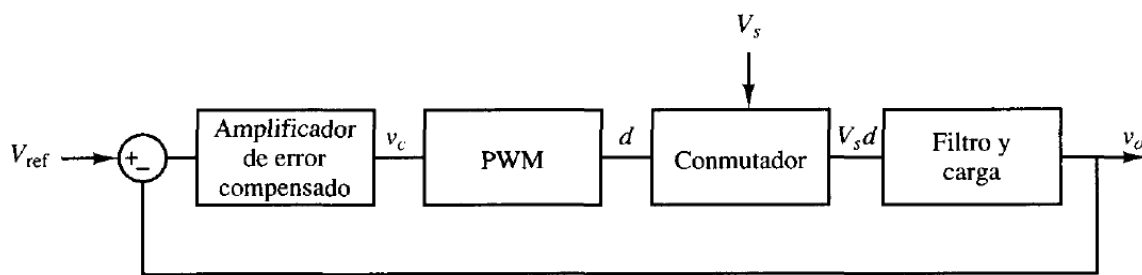


Figura 66. Representación bucle de control [21]

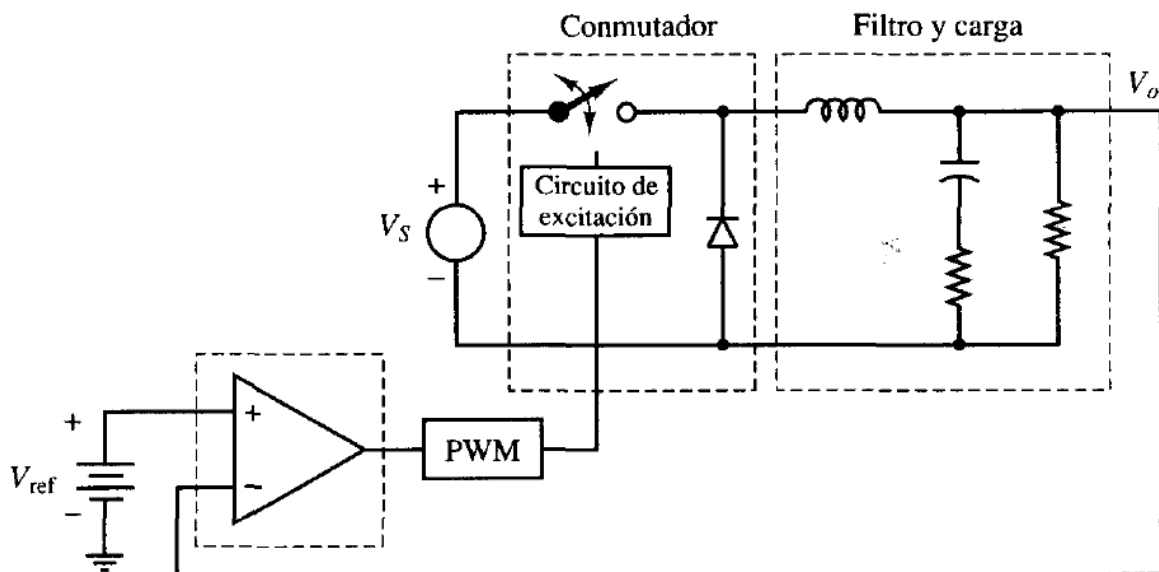


Figura 67. Convertidor reductor con control [21]

El convertidor reductor en modo de corriente continua será nuestro elegido para ilustrar los principios básicos del control de las fuentes de alimentación.

El convertidor junto con el bucle está formado por:

- El interruptor, incluidos el diodo y el circuito de excitación.
- El filtro de salida.
- Un amplificador de error compensado.

- Un circuito PWM (modulador por ancho de pulso), que convierte la salida del amplificador de error compensado en ciclo de trabajo para gobernar el interruptor.

Estabilidad del bucle de control

Las características y la estabilidad de un bucle de control para la regulación de la tensión de salida de un convertidor pueden determinarse a partir de las características del bucle abierto:

1. La ganancia a frecuencias bajas debe ser grande para que el error en régimen permanente entre la salida y la señal de referencia sea pequeño.
2. La ganancia a la frecuencia de conmutación del convertidor debe ser pequeña.
3. El desplazamiento de fase en bucle abierto a la frecuencia de cruce (la frecuencia para la cual la ganancia en bucle abierto es la unidad) debe tener un retardo menor que 180° . Si el retardo es de 180° , la realimentación negativa producirá un desfase adicional de 180° , por lo que el desfase total será de 360° (o cero). Una ganancia de magnitud igual a la unidad y una fase de 360° en el bucle hacen que éste sea inestable. La diferencia entre 180° y el desfase en bucle abierto a la frecuencia de cruce se denomina margen de fase. Para conseguir la estabilidad se suele seguir el criterio de que el margen de fase sea al menos de 45° .

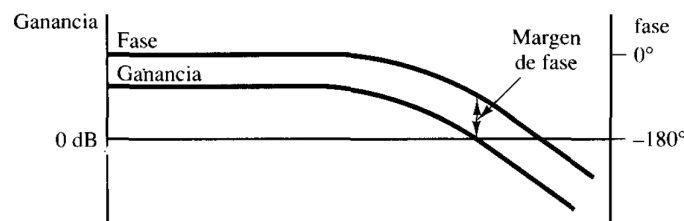


Figura 68. Margen de fase [21]

Es necesario desarrollar las funciones de transferencia para cada bloque del sistema de control.

Análisis en pequeña señal

El análisis de los bucles de control se basa en el comportamiento dinámico de las tensiones, las corrientes y la conmutación, al contrario que el análisis en régimen permanente, en el que las magnitudes promediadas del circuito son constantes. El comportamiento dinámico puede describirse en función de pequeñas variaciones de las señales alrededor de un punto de operación en régimen permanente. La tensión

de salida, el ciclo de trabajo, la corriente en la bobina, la tensión de alimentación y otras magnitudes se representan de la siguiente manera

$$v_o = V_o + \tilde{v}_o \quad [77]$$

$$d = D + \tilde{d} \quad [78]$$

$$i_L = I_L + \tilde{i}_L \quad [79]$$

$$v_s = V_s + \tilde{v}_s \quad [80]$$

Los términos en régimen permanente o de continua se representan en mayúsculas, los elementos señalados con una tilde «~» representan los términos de alterna o perturbaciones de pequeña señal, y la suma es la magnitud total representada, mediante letras minúsculas.

Función de transferencia del interruptor

Para propósitos de control, los valores medios de las tensiones y las corrientes son más útiles que los valores instantáneos que se producen durante el periodo de conmutación. En las siguientes figuras vemos representadas los equivalentes del interruptor de un convertidor reductor. La transformación ideal sería 1:d en referencia a la imagen central, refleja la relación entrada vs salida del interruptor para un ciclo de trabajo variable en el tiempo. En ella, d representa un ciclo de trabajo variable en el tiempo formado por una componente continua D sumada a una componente de pequeña señal $\tilde{d}$.

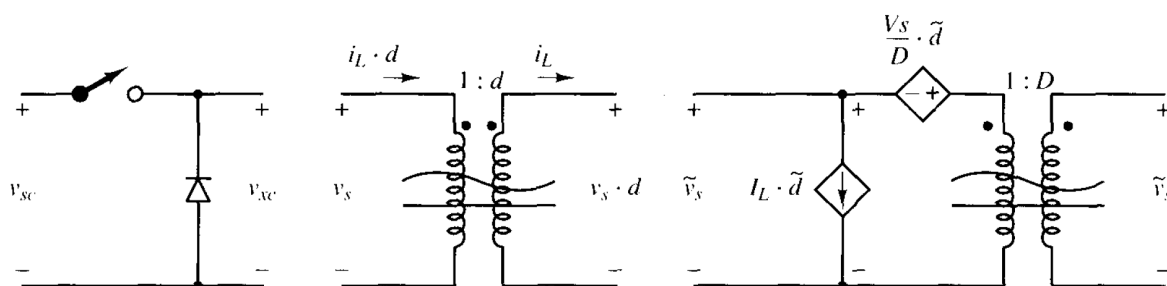


Figura 69. Modelos de interruptor: 1) Interruptor y diodo, 2) Modelo promediado, 3) Modelo pequeña señal. [21]

La representación alternativa del interruptor modelado en pequeña señal, separa las componentes de régimen permanente y de pequeña señal. La relación entre la tensión en el secundario del transformador v_x y la tensión de la fuente es:

$$v_x = v_s d = (V_s + \tilde{v}_s)(D + \tilde{d}) = V_s D + \tilde{v}_s D + V_s \tilde{d} + \tilde{v}_s \tilde{d} \quad [81]$$

Si despreciamos el producto de los términos de pequeña señal,

$$v_x = V_s D + \tilde{v}_s D + V_s \tilde{d} \quad [82]$$

$$\tilde{v}_x = \tilde{v}_s D + V_s \tilde{d} \quad [83]$$

De manera similar, la relación entre la corriente del lado del transformador correspondiente al generador y la corriente en el secundario es:

$$i_s = i_L d = (I_L + \tilde{i}_L)(D + \tilde{d}) \quad [84]$$

$$\tilde{i}_s = \tilde{i}_L D + I_L \tilde{d} \quad [85]$$

El circuito de la figura que estamos analizando, el cual tiene una relación de transformación D y sus términos de pequeña señal están incluidos en las fuentes dependientes, satisface los requisitos de tensión y de corriente para el interruptor expresados en las ecuaciones resultantes anteriores para $\tilde{v}_x$ e $\tilde{i}_s$.

Función de transferencia del filtro

La entrada del filtro del convertidor reductor es la salida del interruptor, cuyo valor es $v_x = V_d d$ en un circuito promediado operando en modo de corriente permanente. La función de transferencia del filtro R-L-C del convertidor en oposición se obtiene analizando directamente el circuito en el dominio de s .

Podemos obtener la función de transferencia del filtro con la resistencia de carga incluida utilizando la figura siguiente:

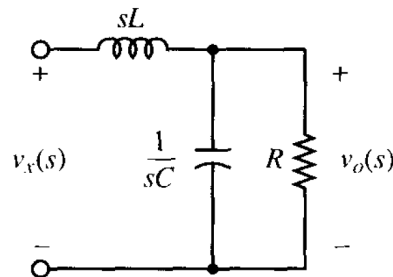


Figura 70. Circuito para deducir función de transferencia del filtro con un condensador ideal [21]

El resultado es:

$$\frac{v_o(s)}{v_x(s)} = \frac{v_o(s)}{v_s d(s)} = \frac{1}{LC\left(s^2 + s\left(\frac{1}{RC}\right) + \frac{1}{LC}\right)} \quad [86]$$

$$\frac{v_o(s)}{d(s)} = \frac{V_s}{LC\left(s^2 + s\left(\frac{1}{RC}\right) + \frac{1}{LC}\right)} \quad [87]$$

Como indica el título de la imagen anterior, éstos resultados han sido obtenidos del cálculo con componentes ideales. Para un cálculo real con un condensador con resistencia equivalente serie (ESR), la función de transferencia sería:

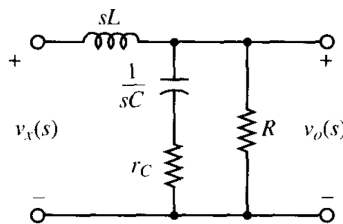


Figura 71. Circuito para deducir función de transferencia del filtro con un condensador no ideal [21]

$$\frac{v_o(s)}{d(s)} = \frac{V_s}{LC} \left[\frac{1 + sr_c R}{s^2 \left(1 + \frac{r_c}{R}\right) + s \left(\frac{1}{RC} + \frac{r_c}{L}\right) + \frac{1}{LC}} \right] \quad [88]$$

El numerador del resultado indica que la resistencia equivalente en serie del condensador produce un cero en la función de transferencia, lo que puede ser importante para determinar la estabilidad del sistema.

Función de transferencia del circuito PWM

El circuito PWM (Pulse Width Modulator, modulador por ancho de pulso) toma la salida del amplificador de error compensado y la convierte en un ciclo de trabajo. La tensión de salida del amplificador de error v_c , se compara con una forma de onda de diente de sierra de amplitud V_p , como se muestra en la imagen a continuación.

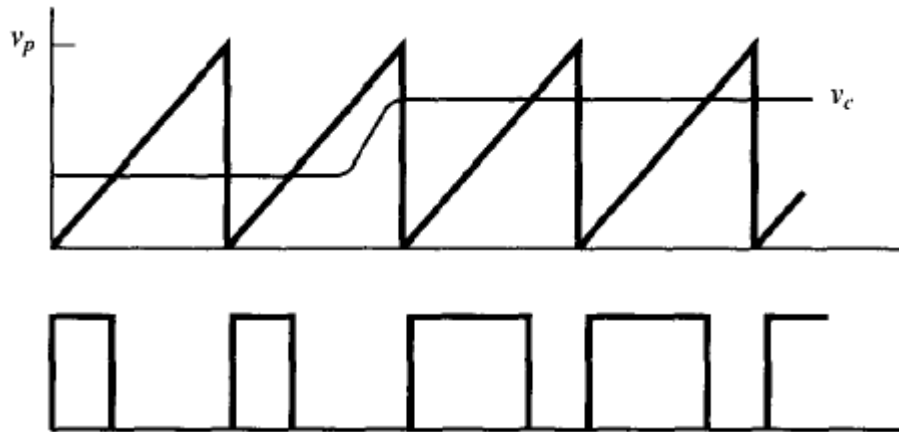


Figura 72. Proceso PW: Salida nivel alto cuando v_c del amp. de error es mayor que la onda diente de sierra. [21]

La salida del circuito PWM es un nivel alto cuando v_c , es mayor que la forma de onda de diente de sierra y es cero cuando es menor. Si la tensión de salida cae por debajo de la referencia, aumentará el error entre la salida del convertidor y la señal de referencia, por lo que aumentarán v_c , y el ciclo de trabajo. Recíprocamente, un aumento de la tensión de salida reducirá el ciclo de trabajo. Se puede deducir la función de transferencia del proceso PWM a partir de la siguiente relación lineal:

$$d = \frac{v_c}{V_p} \quad [89]$$

La función de transferencia del circuito PWM será:

$$\frac{d(s)}{v_c(s)} = \frac{1}{V_p} \quad [90]$$

Amplificador de error con compensación

El amplificador de error compara la tensión de salida del convertidor con una tensión de referencia para producir una señal de error, que se utilizará para ajustar el ciclo de trabajo del interruptor. La compensación asociada al amplificador determina el funcionamiento del bucle de control y proporciona un sistema de control estable.

La función de transferencia del amplificador de error compensado debe proporcionar una característica para el bucle abierto y para el bucle cerrado coherente con los criterios de estabilidad descritos anteriormente. Esto significa que el amplificador debe presentar una ganancia alta a frecuencias bajas y una ganancia pequeña a altas frecuencias.

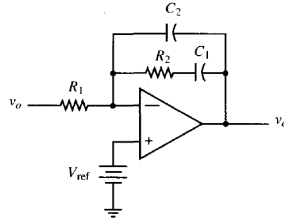


Figura 73. Amp. error compensado tipo 2. [21]

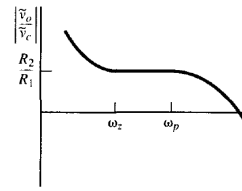


Figura 74. Respuesta en frecuencia [21]

Éstas figuras muestran un amplificador que cumple los requisitos marcados. Este amplificador de error con compensación se denomina comúnmente amplificador Tipo 2.

La función de transferencia del amplificador para pequeña señal (sin términos de continua) se expresa en función de las impedancia de entrada y de realimentación Z_i y Z_f , siendo:

$$Z_i = R_1 \quad [91]$$

$$Z_f = \left(R_2 + \frac{1}{sC_1} \right) \parallel \frac{1}{sC_2} \quad [92]$$

Por lo cual, el resultado es:

$$\frac{\tilde{v}_c(s)}{\tilde{v}_o(s)} = - \frac{Z_f}{Z_i} = - \frac{\left(R_2 + \frac{1}{sC_1} \right) \frac{1}{sC_2}}{R_1 \left(R_2 + \frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2} \right)} \quad [93]$$

Reordenando los términos y suponiendo que C_2 es mucho menor que C_1 :

$$\frac{\tilde{v}_c(s)}{\tilde{v}_o(s)} = - \frac{s + \frac{1}{R_2 C_2}}{R_1 C_2 s \left(s + \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2} \right)} \approx - \frac{s + \frac{1}{R_2 C_1}}{R_1 C_2 s \left(s + \frac{1}{R_2 C_2} \right)} \quad [94]$$

La función de transferencia presenta un polo en el origen y un cero y un polo en:

$$w_z = \frac{1}{R_2 C_1} \quad [95]$$

$$w_p = \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2} \approx \frac{1}{R_2 C_2} \quad [96]$$

Los valores de R_1 , R_2 , C_1 y C_2 se seleccionan de manera que el sistema de control presente las características deseadas.

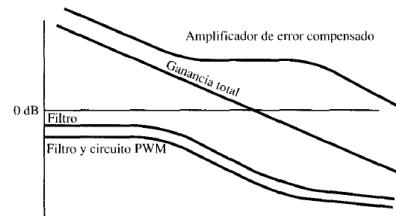


Figura 75. Respuesta en frecuencia de la función de transferencia del bucle de control [21].

La frecuencia combinada de las funciones de transferencia del PWM, el interruptor y el filtro de salida convertidor tipo 2 es reflejada en la figura justo superior.

La resistencia equivalente serie del condensador produce un cero en $w = \frac{1}{r_c C}$.

Diseño de un amplificador de error compensado

Para iniciar el diseño del amplificador, debemos seleccionar la ganancia para frecuencias medias y el polo y el cero de la función de transferencia del amplificador de error compensado para obtener la frecuencia de cruce y el margen de fase totales en bucle abierto necesarios para garantizar la estabilidad.

La función de transferencia del amplificador de error compensado puede expresarse de la manera $s=jw$

$$\frac{\tilde{v}_c(jw)}{\tilde{v}_o(jw)} = - \frac{jw + w_z}{R_1 C_2 jw (jw + w_p)} \quad [97]$$

Para frecuencias medias, $w_z \ll w \ll w_p$, queda como resultado:

$$\frac{\tilde{v}_c(jw)}{\tilde{v}_o(jw)} = - \frac{jw}{R_1 C_2 jw w_p} = \frac{1}{R_1 C_2 \left(\frac{1}{R_2 C_2} \right)} = - \frac{R_2}{R_1} \quad [98]$$

El ángulo de fase de la función de transferencia es:

$$\begin{aligned} \theta_c &= -180 + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_z}\right) - 90 - \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) \rightarrow \\ \theta_c &= -270 + \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_z}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) \end{aligned} \quad [99]$$

El siguiente es un procedimiento de diseño del amplificador de error compensado de Tipo 2:

1. Seleccione la frecuencia de cruce deseada para la función de transferencia total en bucle abierto. Esta frecuencia suele ser un orden de magnitud menor que la frecuencia de conmutación del convertidor.
2. Determine la función de transferencia y la respuesta en frecuencia de todos los elementos del circuito de control, a excepción del amplificador de error compensado.
3. Determine la ganancia para frecuencias medias del amplificador de error compensado que será necesaria para obtener la frecuencia de cruce total deseada. De esta manera se establecerá la relación R_2/R_1 , de la ecuación de frecuencias medias.
4. Seleccione el margen de fase necesario para asegurar la estabilidad. Este margen de fase suele ser mayor de 45° . Una vez establecidas las resistencias R_1 y R_2 para la ganancia a frecuencias medias, calcularemos el polo y el cero (ω_p y ω_z) a partir de C_1 y C_2 . El ángulo de fase del amplificador de error compensado a la frecuencia de cruce es:

$$\theta_{co} = -270 + \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{co}}{\omega_z}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{co}}{\omega_p}\right) \quad [100]$$

Un método para seleccionar las frecuencias de los polos y los ceros es el método del factor K . Se define:

$$K = \frac{\omega_{co}}{\omega_z} = \frac{\omega_p}{\omega_{co}} \quad [101]$$

El ángulo de fase a la frecuencia de cruce será:

$$\theta_{co} = -270 + \tan^{-1}K - \tan^{-1}\left(\frac{1}{K}\right) \quad [102]$$

El ángulo de fase del amplificador de error compensado es función de K. En la siguiente tabla se muestra el desfase en el amplificador de error compensado para determinados valores de K.

K	θ_c
2	-233°
2,5	-224°
3	-217°
4	-208°
5	-203°
6	-199°

El ángulo de fase del amplificador de error compensado que es necesario para obtener el margen de fase, se determina estableciendo el valor de K. Si conocemos ω_{CO} , calcularemos ω_z y ω_p usando las ecuaciones obtenidas con anterioridad en este apartado

6. DRIVERS LED DE APLICACIÓN EN EL AUTOMÓVIL

La fiabilidad de los faros, pilotos e intermitentes representan un factor clave para la seguridad de los conductores y de los peatones, por eso, uno de los mayores fabricantes de electrónica a nivel mundial, como es STMicroelectronics, ofrece una gran selección de driver de iluminación y para cualquier otra función electrónica que podemos encontrar el faro. Éstos están preparados para controlar en zonas altas o zonas bajas, para encender luces interiores, faros y pilotos desde baja potencia como puede ser un intermitente hasta alta potencia como es el caso de una luz de cruce.

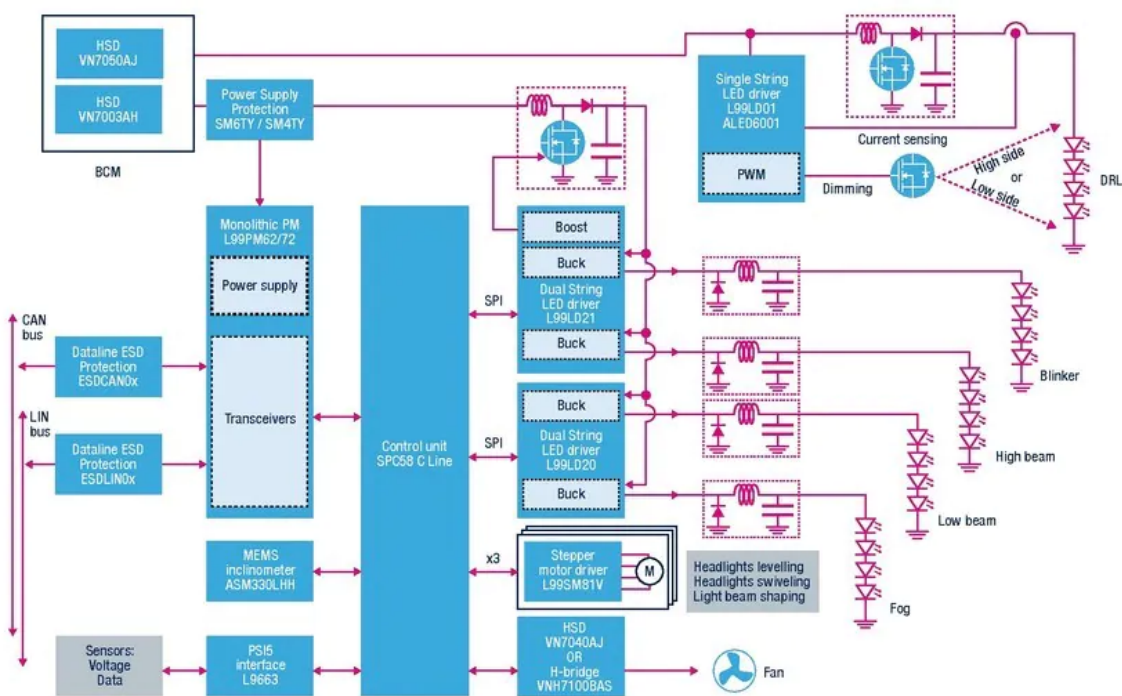


Figura 76. Esquema eléctrico de un faro [23]

Como es apreciable en la figura 76, la mayoría de las funciones están manejadas por un regulador reductor (Buck), aquellas funciones que tienen pocos LEDs por rama necesitan de una tensión menor que la proporcionada por la batería del automóvil. En las plataformas de venta online como Amazon o Aliexpress es muy fácil encontrar un circuito con la topología buck para poder probar en el laboratorio, pero existiendo la posibilidad de utilizar placas de evaluación que conectan al alumno con las necesidades reales de una empresa que desarrolla iluminación para automoción, es preferible analizar la viabilidad del departamento de comprar varias placas de las ofertadas por STMicroelectronics.

Una de ellas se trata de un convertidor BUCK, con un rango de tensión de entrada entre 4,5V y 60V, con una corriente de LED programable de hasta 1A y construido con transistores MOSFET diseñados para alcanzar hasta 3A en corriente continua según las condiciones de aplicación. LED6000 es el nombre del driver integrado en la placa de prototipos y STEVAL-ILL078V1 es el nombre de la propia placa.

El driver LED6000 es una fuente de alta intensidad para manejar LED. Tiene capacidad de implementar un dimming digital a través de su pin exclusivo para ello. El dimming es la capacidad de controlar la intensidad de salida gracias a una señal digital en la cual según su tiempo de ciclo oscilarán su intensidad entre los valores extremos.

La frecuencia de conmutación y la corriente límite son ajustables en función de la aplicación, gracias al oscilador interno de 250 kHz y su capacidad de incrementar esta frecuencia de manera externa hasta 1.5 MHz.

Otro punto a favor de este dispositivo, es que STMicroelectronics ofrece una herramienta online “eDesignSuite” en la cual, aportando tus necesidades, ésta devuelve los dispositivos disponibles y los esquemáticos con sus valores de componentes. Además es posible descargarse modelo 3D, footprint y símbolo del dispositivo para poder realizar tu propio diseño y mandarlo a fabricar.



Figura 77. Placa de experimentación [24]

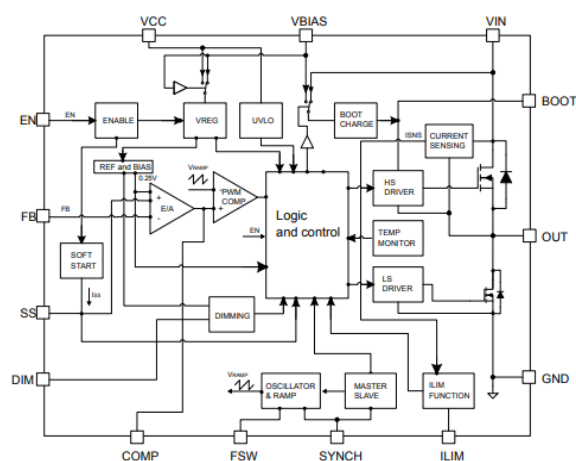


Figura 78. Diagrama de bloques LED6000 [24]

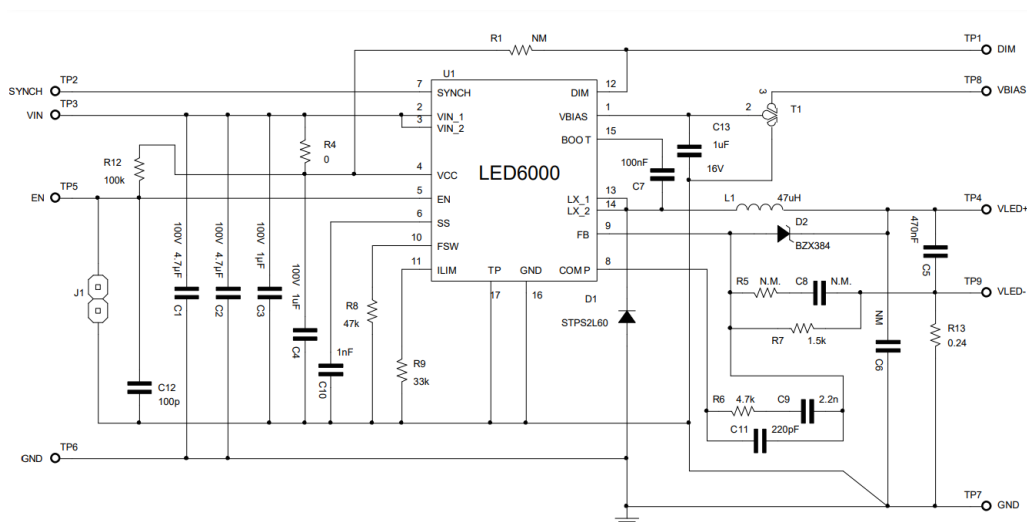


Figura 79. Esquemático de la placa experimentación [24]

Otro importante fabricante de electrónica para la industria de la automoción es NXP. En la línea de este trabajo, NXP ofrece driver con múltiples canales para poder gestionar diversas ramas de LED con un mismo dispositivo o la capacidad elevar dichas ramas agregando en paralelo el número necesario de driver para gestionar todas las ramas de LEDs.

Los convertidores elevadores (Boost) y reductores (Buck) han sido desarrollados como una solución rentable para módulos de controladores LED multicanal. Están diseñados para abordar la creciente demanda de una única arquitectura de plataforma flexible y escalable, compatible con una gama completa de características de iluminación LED nuevas y existentes con un alto grado de reutilización y tiempos de desarrollo más cortos.

Los beneficios clave por los que han elegido estos dispositivos para su implementación en la industria de la automoción son:

- Arquitectura compacta y económica para la configuración de todas las ramas de LED.
- Compatibilidad entre dispositivos que permite desarrollos de PCB escalables.
- Alta capacidad de reutilización de los diseños lo que permite un menor tiempo de desarrollo
- Robustos, fiables y eficientes.

La topología Buck, la cual soporta entradas de tensión de hasta 80 V, permite una gran flexibilidad en tensiones de salida por cada canal, habilitando aplicaciones con más de 20 LEDs.

Dentro de esta compañía, para la gestión de los LEDs, se centran en dos familias: ASLx50y y ASLx41y, ambos soportan una arquitectura común, con una pequeña cantidad de componentes externos pueden gestionar cualquier configuración de ramas de LED. A su vez, como tienen compatibilidad entre pines, pueden compartir la misma PCB para manejar diferentes aplicaciones por los canales con salidas desde 30 hasta 140 W

La familia ASLx50y está formada por convertidores elevadores (Boost) multifase que permiten dos salidas diferentes de tensión, programables por SPI, con una precisión del 3%. Con SPI también es posible ajustar la frecuencia de conmutación desde 125 hasta 700 kHz.

Soporta una monitorización de las tensiones de entrada y salida, incluso optimizando el diseño con un ajuste de las fases de salida se puede reducir la ondulación en la línea de alimentación, reducir el coste del sistema, mejorar la eficiencia y el comportamiento de la compatibilidad electromagnética.

Por otro lado, la familia ASLx41y se forma, al contrario que la anterior, por convertidores reductores (Buck) multicanal, proporcionando corriente constante a los LEDs independientemente de la tensión de entrada. Nuevamente la SPI entra en funcionamiento para programar la corriente de salida, hasta 1.5 A con una precisión del 5%. Para obtener esa máxima corriente de salida, es necesario dos canales de salida conectados o cambiar algunos componentes externos.

El PWM dimming es posible desde 0 ó 1.5 hasta 100% con una resolución de 0.1%, con una ancho de tensión de salida desde 2.5 hasta 70 V, pudiendo manejar hasta 20 LEDs.

Esta última familia de dispositivos pueden monitorizar la tensión de salida de los LEDs y detectar fallos como circuito abierto o derivaciones a masa.

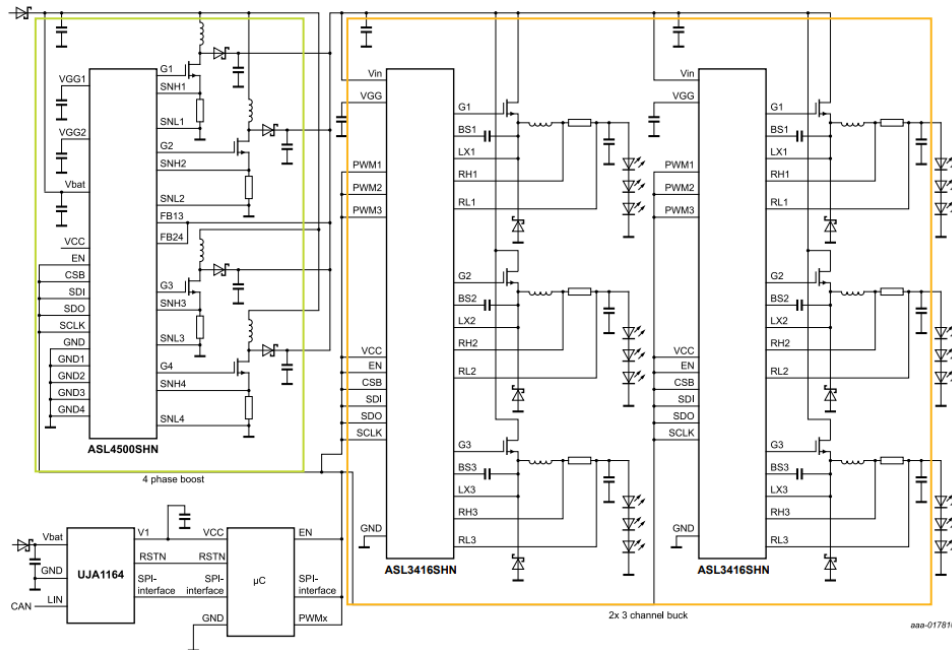


Figura 80. Arquitectura para 6 canales de control LED. [25]

Los LEDs están revolucionando la industria de la automoción gracias a su versatilidad y eficiencia. Están en todos los sitios del automóvil donde sean necesarios, desde los faros, pasando por los pilotos, en la retroiluminación del GPS o incluso LED infrarrojos para monitorizar el sistema de conducción.

Estas aplicaciones deben ser pequeñas y eficientes para tener cabida en los sitios tan reducidos donde se encuentran y sin poder sobrecalentarse.

6.1. DIFERENTES TOPOLOGÍAS SEGÚN LA APLICACIÓN EN EL AUTOMÓVIL:

- Interior Lighting: para aplicaciones de luces de techo o para la iluminación del espejo que se encuentra en el parasol, no son necesarios más de 2 LEDs por función, por ello, el driver más utilizado es el convertidor Buck.
- Exterior lighting y señalización: Las luces diurnas, antiniebla, intermitentes o luces traseras, necesitan al menos 3 o 4 LEDs para aportar la intensidad lumínica (cd) necesarias por reglamentación, el rango de tensión necesario varía entre 10,5 hasta 14 V y con la batería del coche oscilando entre 6

(arranque frío) hasta 16 V, la mejor configuración es un conversor reductor-elevador (Buck-Boost).

- Para funciones de los faros en las que se necesitan largas cadenas de LEDs, como por ejemplo las luces de cruce y ruta, al ser operadas por muchos LEDs de media o baja potencia. El mejor dispositivo es un convertidor elevador (Boost).

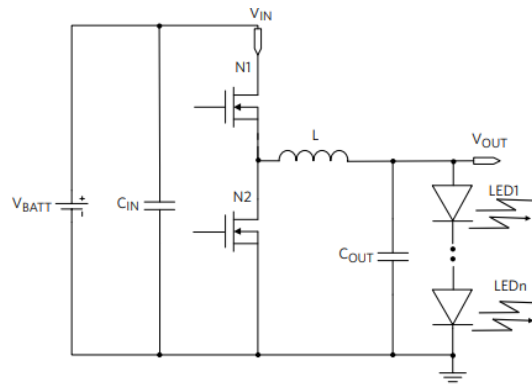


Figura 81. Convertidor Buck en configuración típica para manejar LED [25]

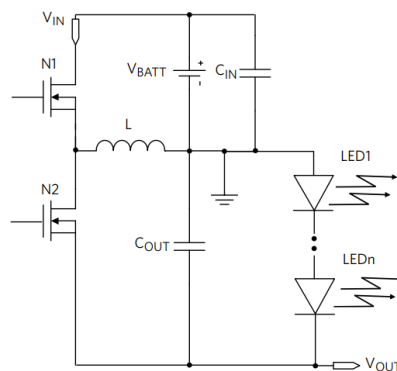


Figura 82. Convertidor Buck-Boost derivado de un Buck [25]

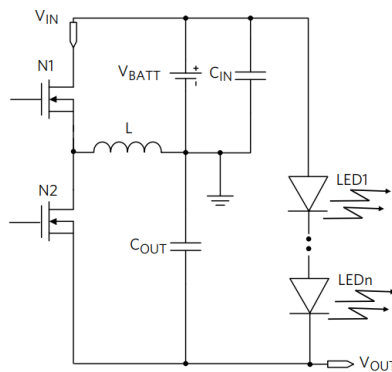


Figura 83. Convertidor Boost derivado de un Buck [25]

Como podemos observar en la figuras 81, 82 y 83, la iluminación LED en el automóvil permite una solución general al no hacer diferencias por la posición de la tensión de referencia de la rama, es decir, podemos encontrar la tensión de salida en el ánodo como en la figura 81 o en el cátodo como en las figuras 82 y 83. Ésto abre muchas oportunidades para adoptar topologías derivadas del convertidor buck para el boost y el buck-boost, como se aprecia en las tres figuras superiores. Ésto hace que el cátodo esté conectado a masa en el convertidor buck mientras que el ánodo está conectado a V_{out} , mientras que para un boost o buck-boost con la topología de un buck, las conexiones de cátodo y ánodo están invertidas, V_{out} y masa respectivamente como punto de conexión en estas estructuras.

Lo explicado anteriormente es de aplicación en el IC driver MAX25610A, el cual proporciona corriente de salida constante para controlar LEDs de alta potencia. Tiene una configuración flexible el cual soporta convertidor reductor, elevador-reductor invertido y elevador invertido. Para seleccionar la manera de actuar el dispositivo necesita un resistencia externa entre los pines de VCC y PWMFRQ, 2.49k Ω para Buck y 17.8k Ω para los dos modos invertidos.

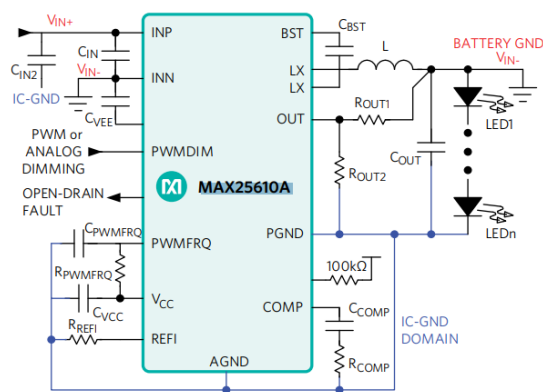


Figura 84 (a). Convertidor flexible integrado MAX25610A [26]

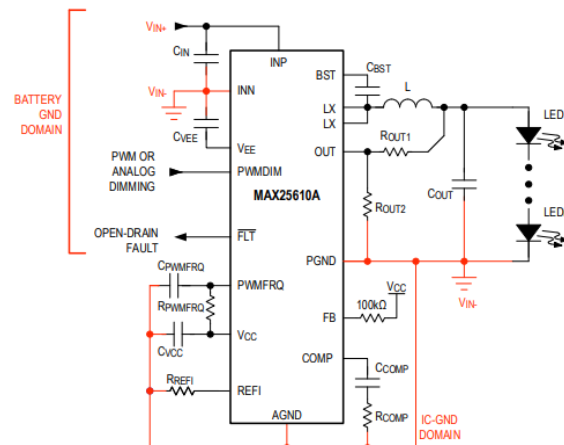


Figura 84 (b). MAX25610A en aplicación Buck [60]

El fabricante Maxim Integrated en el apartado “Typical Application Circuits” de la hoja de característica del circuito integrado MAX25610A que encontramos en la referencia bibliográfica 64, facilita a los diseñadores el esquemático para diferentes topologías, ejemplo de ello la encontramos la figura 84 (b).

6.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA ARQUITECTURA

6.2.1. BUCK

- El controlador reductor, regula la corriente por la rama con origen en una fuente de mayor tensión que la necesitada por todos los LEDs de la rama.
- Pueden ser conectados sin problemas a la masa del sistema, no es necesaria una masa adicional, aporta seguridad.
- Puede ser adaptado para manejar aplicaciones matriciales o animadas.

Algunas de las características críticas que hay que buscar en un convertidor reductor son:

- Frecuencia fija.
- Alta eficiencia a través de un excelente control de conmutación y baja resistencia a la misma.
- Alta precisión en el rango de la modulación con dimming.
- Un preciso diseño para un amplio espectro de modulación en frecuencia para un excelente comportamiento en interferencias electromagnéticas (EMI)

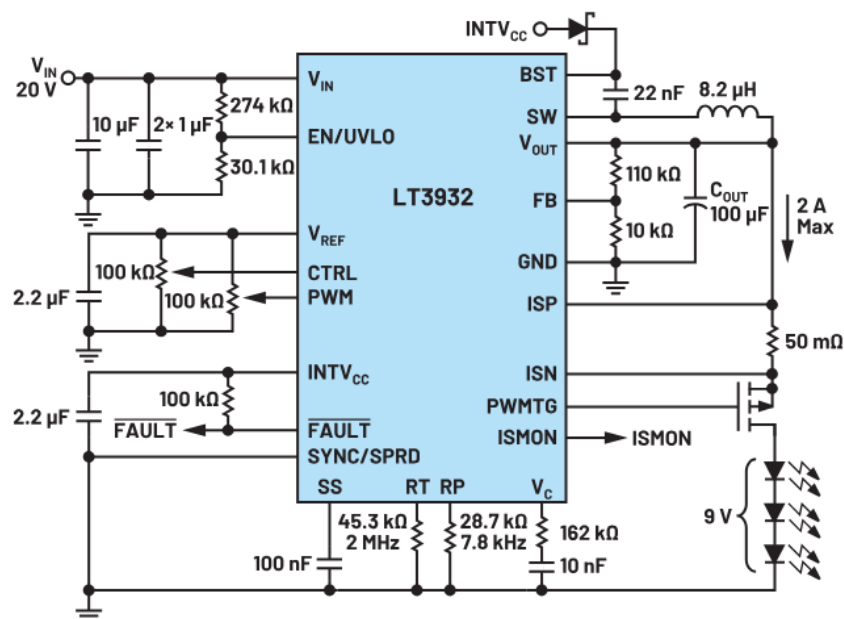


Figura 85. Esquemático de CI LT3932 (Buck) en aplicación LED. [27]

Benefits to Buck LED Drivers	Trade-Offs to Step-Down LED Drivers	Applications
Grounded string—chassis return	Input voltage must be higher than LED voltage	High beam/low beam
Matrix switches can shunt entire string	Preboost regulator required in most automotive systems	Turn signals/animation
Higher bandwidth ($>1/5$ of f_{sw})		Matrix headlamps
Best EMI performance		Short-safe systems
Smallest inductor sizing		

Figura 86. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Buck para LED [27]

6.2.2. BOOST

- El controlador elevador, regula la corriente por una rama de LEDs con origen en una fuente de menor tensión que la necesitada por todos los LEDs de la rama.
- Muy usado en automoción donde todos los LEDs tienen que ir en la misma cadena.
- Buen comportamiento electromagnético

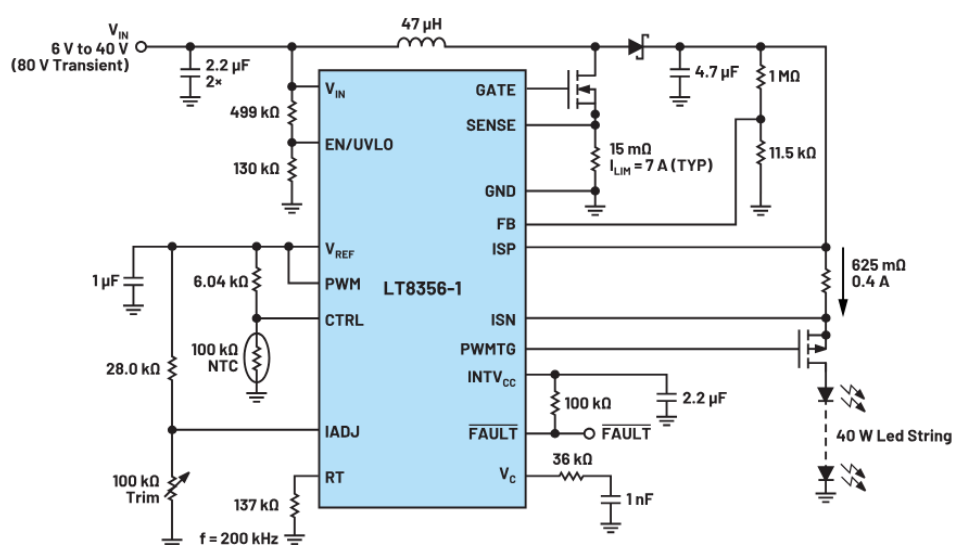


Figura 87. Esquemático de CI LT8356-1 (Boost) [27]

Benefits to Boost LED Drivers	Trade-Offs to Step-Up LED Drivers	Applications
Grounded—chassis return	Input voltage must be higher than LED voltage	High beam/low beam
Typically, smallest total solution size	Lower bandwidth ($<1/20$ of f_{sw})	Heads-up displays
Good EMI performance	Higher inductor current rating	Backlighting
Direct battery to LED conversion	Cannot short output to GND	

Figura 88. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Boost para LED [27]

6.2.3. BOOST - BUCK (DERIVADO DE BOOST)

- Algunos elevadores pueden ser configurados con el cátodo del LED en retorno a la fuente.
- La tensión total de salida es la tensión de entrada, la cual es sumada a la tensión total por la rama de los LEDs.
- El beneficio de esta estructura es que es capaz de controlar cadenas de LEDs con una tensión requerida mayor, menor o igual a la tensión de la fuente.
- Los límites en esta estructura están delimitados por el propio conversor, por abajo está limitado por la tensión mínima de alimentación del controlador y por superior lo marca la capacidad máxima de salida del mismo integrado.

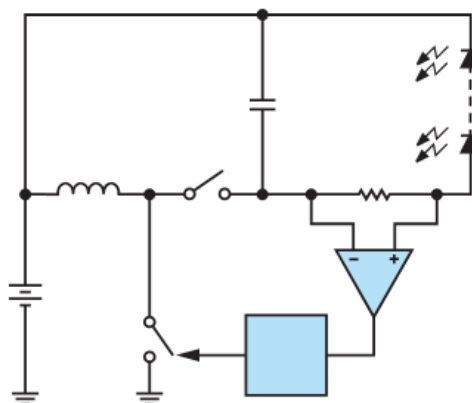


Figura 89. Convertidor Boost-buck [27]

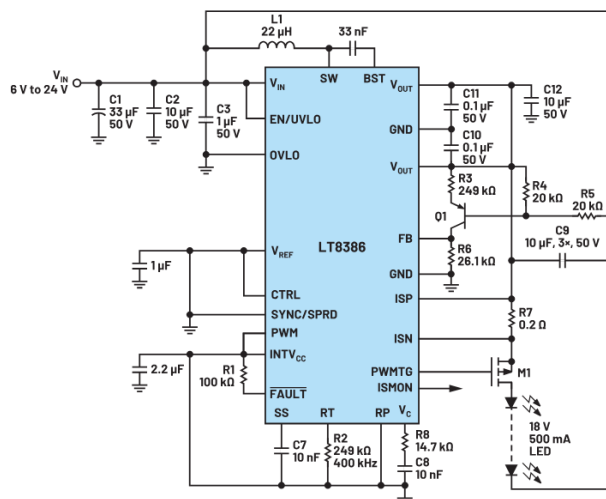


Figura 90. Convertidor Boost-buck: LT8386. [27]

Benefits to Boost-Buck LED Drivers	Trade-Offs to Boost-Buck LED Drivers	Applications
Direct battery to LED conversion	Lower efficiency	High beam/low beam
LED voltage may be higher or lower than supply	Lower bandwidth ($<1/20$ of f_{sw})	Turn signal
Good EMI performance	Higher inductor current rating	Daytime running lights
May use matrix to short entire string	Cannot short output to GND	Multiple strings on the same output

Figura 91. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Boost-Buck para LED [27]

6.2.4. BUCK (DERIVADO DE BOOST)

Algunos elevadores pueden ser configurados como convertidores reductores desde la fuente, en lugar de referenciar a masa, se crea una configuración Buck. Esta configuración presenta las mismas limitaciones que una estructura buck normal, la tensión de rama de los LEDs tiene que ser menos que la señal de entrada de la fuente.

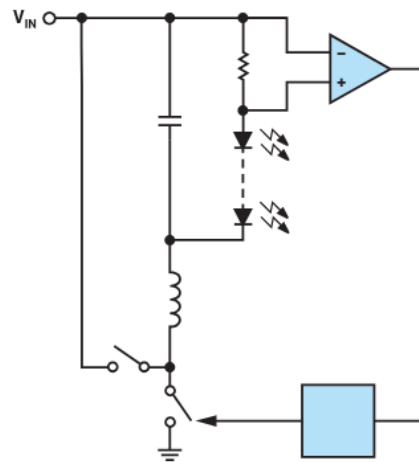


Figura 92. Convertidor modo Buck [27]

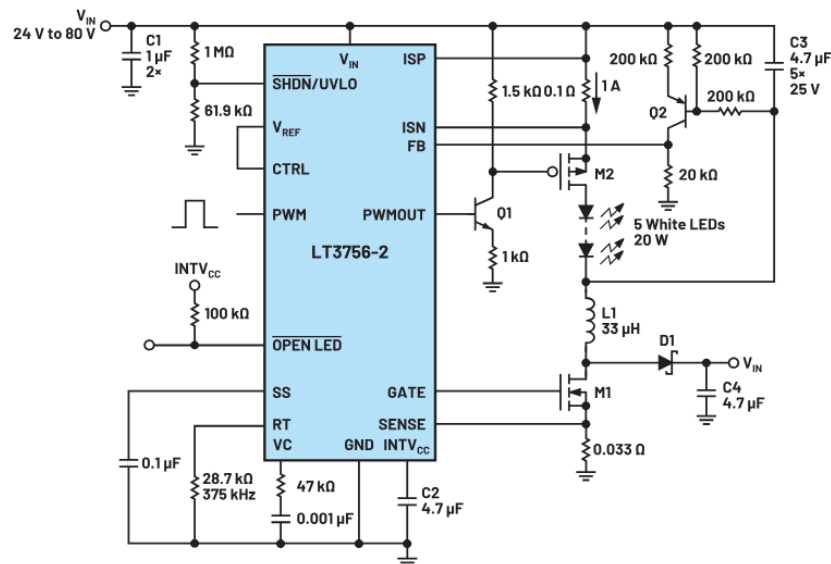


Figura 93. Ejemplo modo Buck: LT3756-2. [27]

Benefits to Buck-Mode LED Drivers	Trade-Offs to Buck-Mode LED Drivers	Applications
Good EMI performance	Input voltage must be higher than LED voltage	High beam/low beam
May use matrix to short entire string	Preboost regulator required in most automotive systems	Turn signal
May use the same driver for multiple applications	Cannot short output (LED cathode) to GND	Daytime running lights

Figura 94. Ventajas y condiciones de uso para convertidor modo Buck para LED [27]

6.2.5. BUCK-BOOST

Un convertidor LED Buck-Boost (reductor-elevador), regula la corriente de los LEDs desde una fuente que es mayor o menor que la tensión total de la rama de los LEDs. El convertidor controla los interruptores de nivel alto conectados a la tensión de entrada en el reductor y los mismos de bajo nivel, situados en el lado de salida que encontramos en el elevador.

Esta topología es la más compleja pero a su vez es la más flexible. Las tensiones de entrada y salida son limitadas únicamente por el controlador integrado. Una de las mejores opciones para aplicaciones matriciales

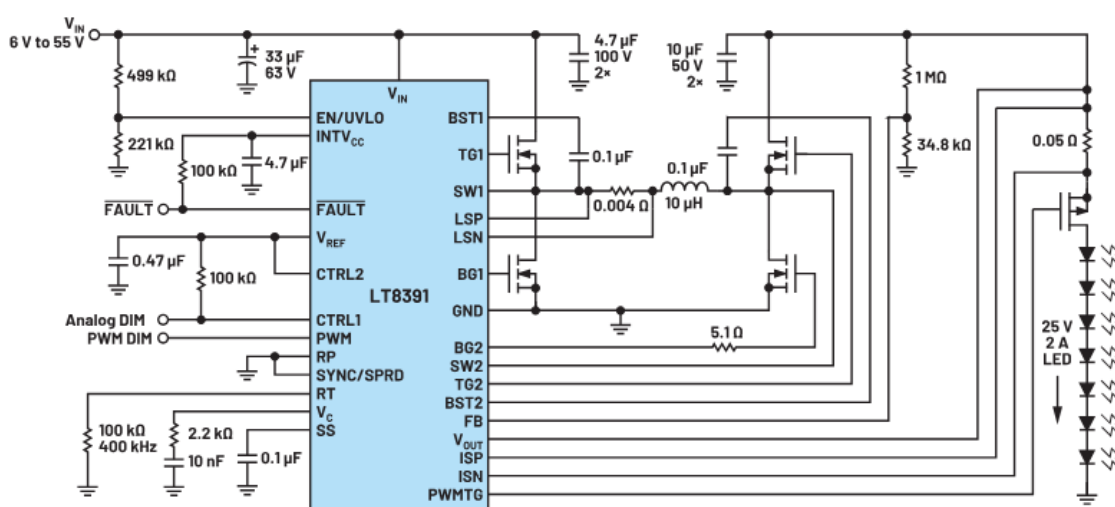


Figura 95. Ejemplo convertidor Buck-Boost [27]

Benefits to Buck-Boost LED Drivers	Trade-Offs to Buck-Boost LED Drivers	Applications
Most versatile topology	A minimum of two switches and two freewheeling diodes is required	High beam/low beam
May use matrix to short entire string	Typically, the lowest conversion efficiency	Turn signal
May use the same driver for multiple applications	Typically, the lowest (worst) EMI performance	Daytime running lights
		Short safe systems

Figura 96. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Buck-Boost para LED [27]

6.3. GESTIÓN APLICACIÓN MATRICIAL

Como ya se viene hablando en el trabajo y además motivo de este trabajo es, el avance de la tecnología en la iluminación del vehículo desde el inicio de los LEDs y siendo mayormente especiales en aquellos faros que incluyen control adaptativo usando controladores de matrices LEDs, en inglés LED matrix managers (LMMs). Un LMM requiere una cierta topología de driver LEDs para su control electrónico.

6.3.1. FAROS ADAPTATIVOS

Una de las ventajas de este tipo de faros es el comportamiento de antideslumbramiento, un faro convencional con su función High Beam, genera un destello inevitable a los demás conductores. Además de evitar el deslumbramiento, puede incrementar su potencia iluminando con mayor intensidad ciertos objetos de la vía.

6.3.2. LMMs

Hay muchas opciones de controlar el brillo de un LED, pero un LMM controla el brillo de desde 6 hasta un máximo de 16 LEDs (capacidad de los dispositivos de Texas Instruments) conectados en serie.

La idea fundamental de un LMM está fundamentada en el posicionamiento en paralelo a cada LED que forma los píxeles de la matriz de un dispositivo que actúa como interruptor. Manejando el encendido y apagado de este interruptor a una frecuencia inapreciable para el ojo humano, controlar el brillo en función del tiempo de ciclo que se programe a los interruptores.

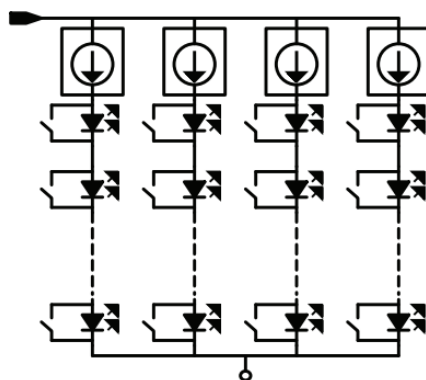


Figura 97. Bloque simplificado de un LMM [29]

Desde el LMM es posible detectar cualquier LED que esté en circuito abierto o en cortocircuito. Si se encuentra en circuito abierto, el LED será protegido para evitar cualquier daño derivando toda la corriente por el transistor, además de proteger el LED permitiremos que sigan funcionando los LEDs restantes.

Como se ha especificado más arriba, un LMM está encendiendo y apagando continuamente pero este solo controla el brillo de los LEDs, no proporciona corriente a los mismos. Debido a la cantidad de LEDs que puede manejar un LMM el driver convertidor que necesita para alimentarlos es un elevador (Boost).

El boost tiene que ser capaz de presentar una respuesta transitoria adecuada para responder a las variaciones debido a los rápidos cambios que experimentan con el apagado y encendido de los interruptores.

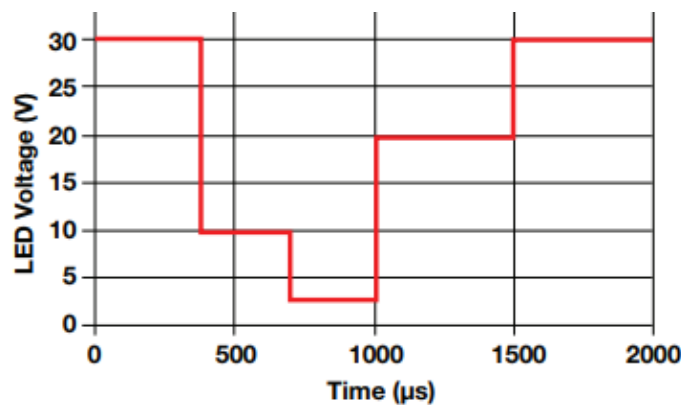


Figura 98. Variación de tensión en los LEDs [29]

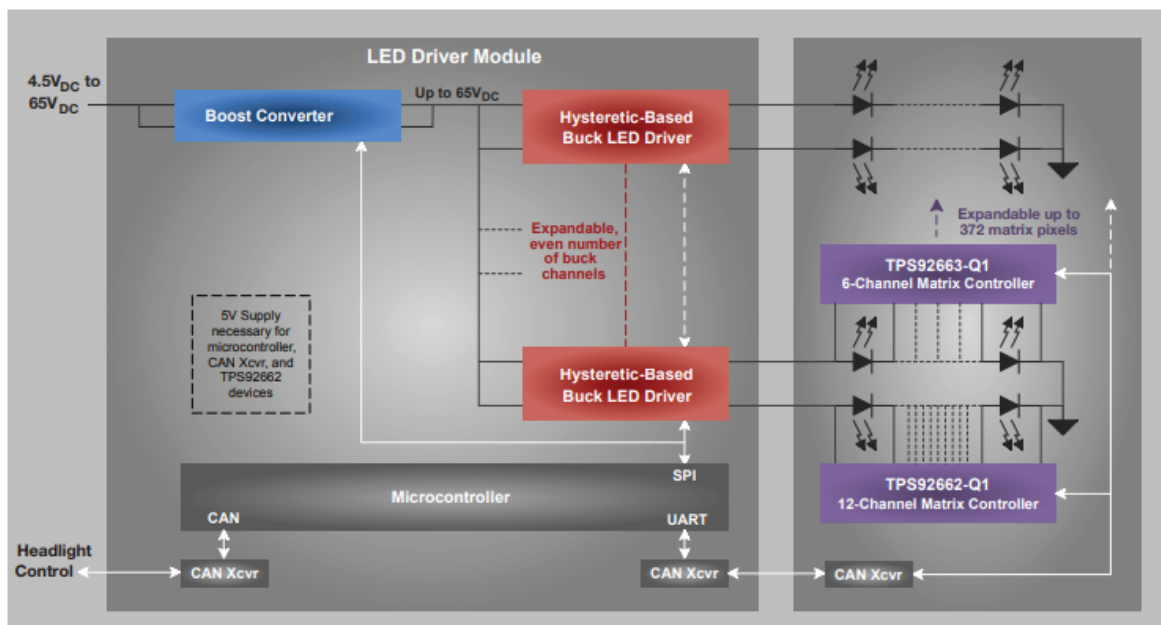


Figura 99. Arquitectura sugerida para LMM [29]

Como vemos en la figura anterior, en la arquitectura que nos sugieren para alimentar un LMM, presenciamos un Boost a la entrada para alimentar a todos los demás dispositivos presentes en la electrónica, pero también hay presentes reguladores Buck. Ésto se debe a la necesidad de controlar los LEDs presentes en la arquitectura y además están organizados en pequeñas ramas de no más de 4 LEDs.

En la industria de la automoción, según qué fabricante, se pueden encontrar diferentes tipos de LMM o MLC (Matrix LED Controller) como los llaman otras empresas. Se pueden elegir por cantidad de canales, si presentan frecuencia propia de conmutación o necesitan ser excitados por otra fuente.

Ejemplo de algunos de ellos son, por parte de Texas Instruments: TPS92665 o TPS92667.

Ambos dos presentan mismo número de canales (16), misma topología de interruptor flotante, misma tensión de alimentación 4.5 - 5.5V. Pero la diferencia está en la frecuencia de conmutación, 665 tiene su propio reloj y 667 necesita del apoyo de 664 o 665 para sincronizarse con alguno de ellos.

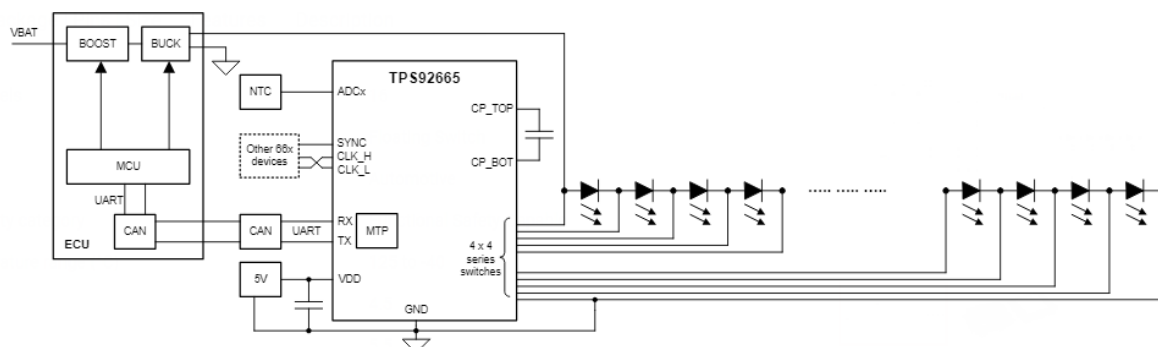


Figura 100. Esquemático TPS92665 [33]

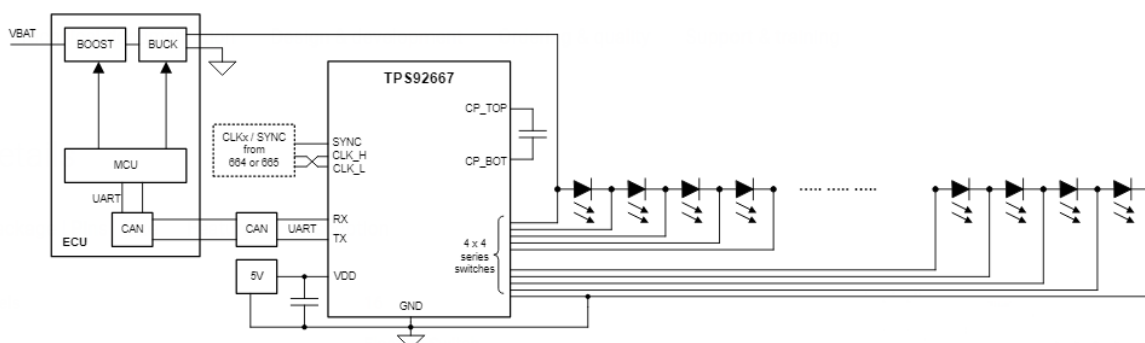


Figura 101. Esquemático TPS92667 [34]

Con objeto de poder ser ensayado en el laboratorio, para introducir a los alumnos en la programación de microprocesadores con comunicación CAN e ir preparados para

la empresa privada en la que el ritmo de la tecnología no para de avanzar, se busca una placa de experimentación con LMM y encontramos con el mismo fabricante de los dos dispositivos mencionados anteriormente, una placa con la capacidad de manejar 64 LEDs, hablamos de *TPS92667EVM-243*

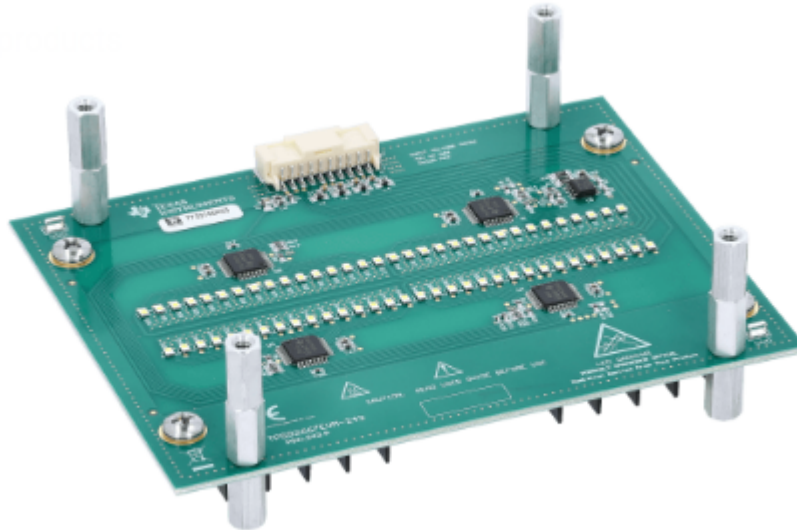


Figura 102. TPS92667EVM-243 [35]

7. INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA

La interferencia electromagnética es un tema muy importante tanto en automoción, el tema que nos ocupa, como en otros campos. Normalmente en las asignaturas de grado es un tema poco tratado por la falta de tiempo asignado a cada una de ellas.

Cada día es más importante la fiabilidad de la electrónica que nos rodea. Toda señal sin la correcta protección sería capaz de generar una interferencia en nuestro dispositivo y por ello es que todos los dispositivos que se lanzan al mercado tienen que pasar una serie de test de inmunidad y emisión de las interferencias, que bien pueden ser radiadas o conducidas.

Inmunidad frente a señales entrantes que encuentra su origen en una interferencia a través del cable (conducida) o a través de ondas que, transmitidas por el aire llegan directamente a nuestro dispositivo (radiadas). Éste mismo tipo de ondas puede ser nuestro driver quien las genere provocando la interferencia a otros dispositivos que compartan arquitectura de diseño. Figura 103.

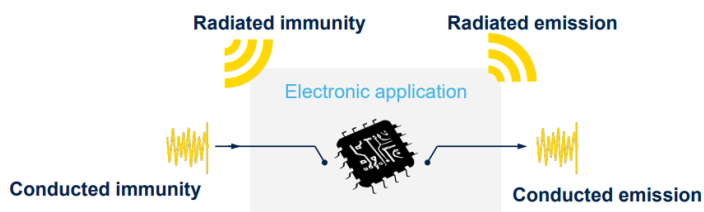


Figura 103. Señales radiadas y conducidas [37]

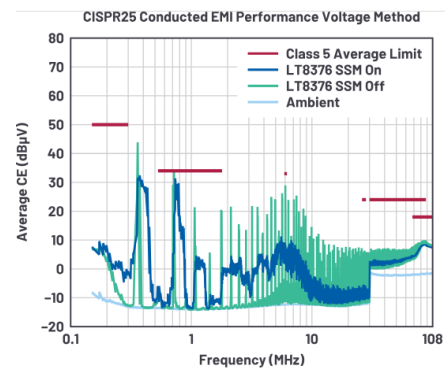


Figura 104. Análisis EMI [38]

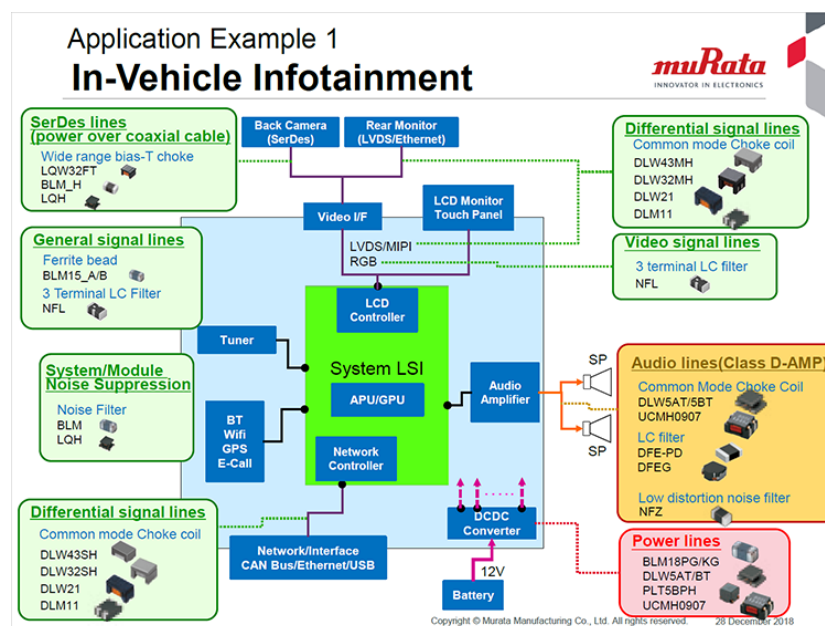


Figura 105. Diferentes tipos de componentes para filtrar EMI [39]

Un barrido en frecuencia en el que se analizan los armónicos de la señal, conocido como análisis de Fourier, es la base de los análisis de interferencia electromagnética como vemos en la figura 104.

En la última figura de la página anterior, la figura 105, encontramos los diferentes dispositivos que hayamos en el mercado para actuar como filtros y actuar en la prevención de la EMI, dichos filtros son analizados a continuación.

La necesidad de un filtro en fuentes de alimentación

No importa el tipo de fuente de alimentación que diseñemos, siempre será necesario que presente algún tipo de filtro de entrada para cumplir con el estándar EMI impuesto por el comité internacional especial de perturbaciones radioeléctricas (CISPR), para automoción en la norma CISPR-25.

Por ejemplo, en cualquier regulador conmutado aparecen asociadas emisiones EMI relacionadas con las frecuencias de conmutación. El ruido generado tiene dos componentes asociadas, una componente radiada y otra conducida que se acoplan a otros circuitos. La siguiente imagen refleja un problema específico de EMI en una placa bien definida la cual no disponía de filtro.

La señal turquesa y amarilla son la media y pico de los niveles de emisiones conducidos, mientras que las líneas rojas horizontales son los límites de emisiones establecidos por CISPR. Un filtro típico supresor de emisiones EMI lo encontramos en la figura 107, la cual está formada básicamente por redes RC y RL.

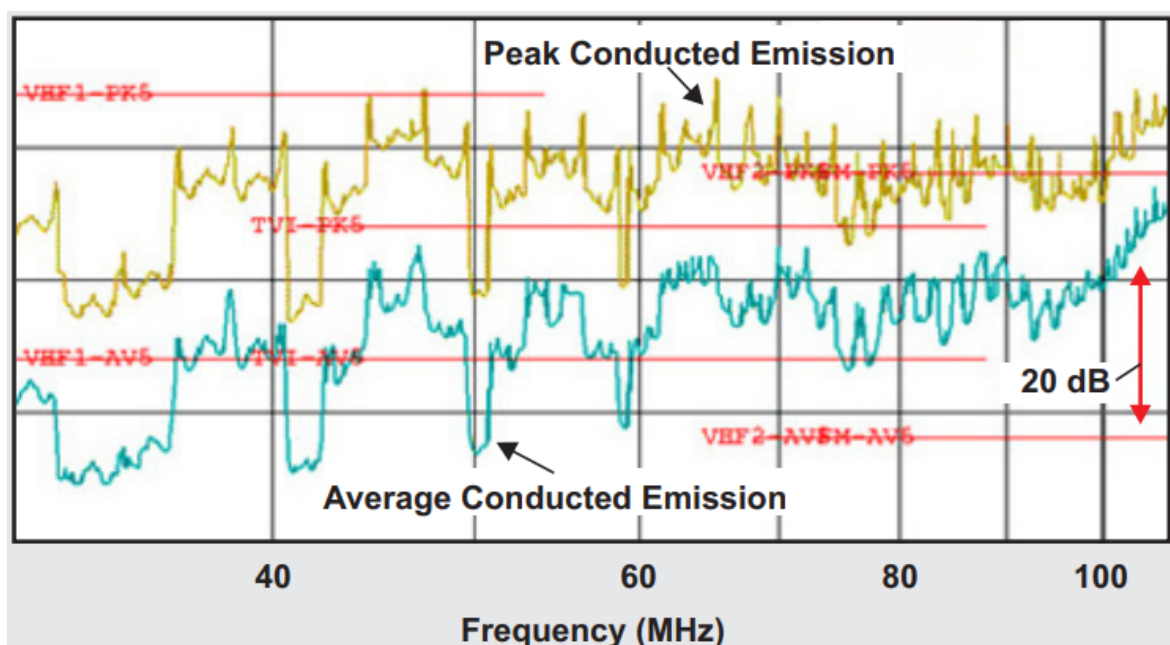


Figura 106. Barrido EMI sin filtro instalado en placa. (CISPR - 25) [40]

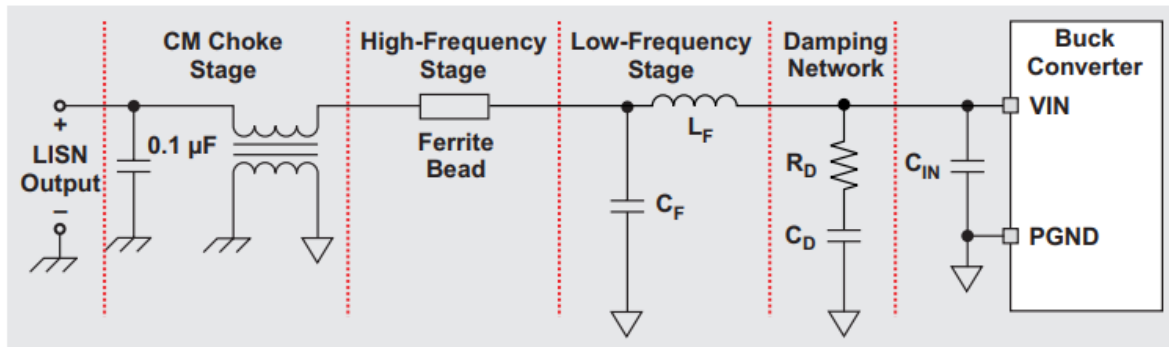


Figura 107. Filtro típico EMI [40]

Etapa de baja frecuencia

En la figura 106, que representa un análisis de Fourier para EMI, podemos apreciar una señal trapezoidal que contiene armónicos pares e impares múltiplos de la frecuencia fundamental.

Un filtro LC atenúa el ruido a la entrada, si el filtro es de segundo orden producirá sobre la señal una atenuación de 40dB/década. Esta información permite determinar la frecuencia de corte necesaria para poder obtener la atenuación requerida del ruido a cierta frecuencia, la unidad de la atenuación es decibelios por microvoltio.

$$A[dB\mu V] = 40 \log\left(\frac{f}{f_c}\right) \rightarrow f_c = f \times 10^{\frac{-A}{40}} \quad [103]$$

Ajustando la frecuencia de corte aseguramos que el tamaño de los componentes sea el adecuado. Si usamos valores grandes de condensadores el coste puede incrementarse mucho y si incrementamos el valor de la bobina mejoramos la atenuación a bajas frecuencias pero comprometemos su trabajo a altas frecuencias.

Filtro Amortiguado

Este tipo de filtro es requerido para reducir el pico en la frecuencia de corte. Dicho pico puede ser resultado de una amplificación significativa del ruido a bajas frecuencias.

Un filtro amortiguado pobre puede tener resultados significativos en la estabilidad del convertidor. La amortiguación está directamente relacionada con la impedancia de salida del filtro EMI. Un circuito típico para el filtro es una red RC en paralelo con la fuente. Replica las características eléctricas de un condensador electrolítico proporcionando un rechazo similar a bajas frecuencias sin necesidad de tomar una gran parte de la placa.

$$R_D = \sqrt{\frac{L_F}{C_{IN}}} \rightarrow C_D = 4C_{IN} \quad [104]$$

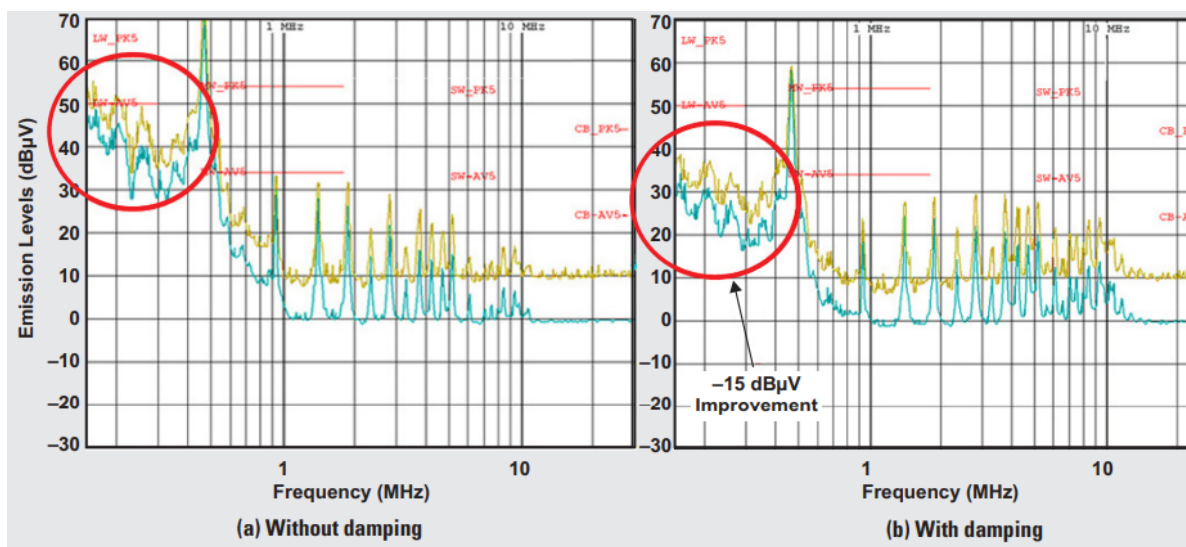


Figura 108. Barrido en frecuencia, sin y con amortiguamiento [40]

Filtrado de ruido en modo común (CM)

Es el ruido más difícil con el que tratar en una fuente conmutada. En un convertidor Buck, la mayor fuente generadora de ruido de modo común es producida por el efecto de la conmutación. La onda conmutada, con una magnitud igual a la tensión de entrada del convertidor, irradia un campo eléctrico y empeora con tensiones de entrada mayores.

La amplitud del campo eléctrico cae inversamente proporcional con la distancia en el campo cercano. Eso es un problema, los diseñadores quieren reducir el tamaño de la implementación pero dejar fija la frecuencia de conmutación, lo que no genera cambios en el tamaño de la bobina.

Una opción para filtrar el ruido de modo común es poner bobinas acopladas en serie con los pines de entrada. Éste método puede proporcionar el suficiente rechazo por encima de los 100 MHz.

Alta frecuencia

Una de las limitaciones de la etapa LC del filtro es la finita SRF (Frecuencia de autoresonancia [Self-Resonant Frequency]), la cual no evita el ruido a altas frecuencias.

Una etapa de altas frecuencias puede aliviar este problema y para ello se utiliza una ferrita, que es un dispositivo con una baja inductancia y unos pequeños parásitos que permiten una SRF muy alta, éstos proporcionan un rechazo a ciento de megahercios.

La ferrita filtra el ruido de modo diferencial a frecuencias por encima del SRF de la etapa de baja frecuencia.

La siguiente imagen demuestra la reducción del rechazo con el incremento de la corriente de polarización por la ferrita, resultando una mayor emisión de ruido.

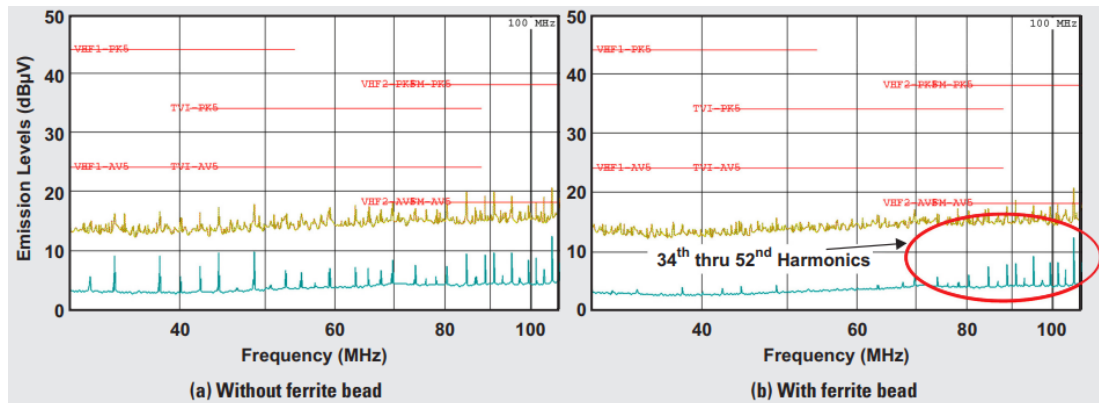


Figura 109. Barrido en frecuencia, sin y con ferrita [40]

BLOQUE PRÁCTICO

Descripción

Este apartado está orientado a trabajar en el laboratorio los conceptos estudiados en el apartado anterior de teoría, para hacer un desarrollo teórico previo, de análisis in situ y terminar con las simulaciones y conclusiones finales sobre cada una de las prácticas propuestas

La distribución horaria quedará de la siguiente manera, con un total de 25 horas prácticas:

DISTRIBUCIÓN	
HORAS	Tarea
4	Caracterización del LED
6	Reguladores lineales componentes activos
8	Driver reguladores lineales integrados
7	Driver reguladores conmutados integrados

La materia se irá realizando en las horas propuestas y quedarán 5 horas de ajuste para repetir las prácticas que el alumno considere o terminar las que tenga en retraso.

Además, éstas prácticas propuestas pueden ser utilizadas en cualquier otra asignatura dentro del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial para el desarrollo y formación en sus contenidos.

La distribución de las prácticas ha sido concentrada con el fin de proporcionar al alumno una mejor percepción horaria de cara al desarrollo de las mismas y no abandonar el buen desarrollo de las prácticas por falta de tiempo.

Práctica 1. CARACTERIZACIÓN DEL LED. (PROFESOR)

1. INTRODUCCIÓN

El símbolo y la característica V-I para los diodos LED se esquematiza en la siguiente figura. Donde se muestran los parámetros característicos de los diodos:

- **Corriente máxima:** Máxima corriente que soporta el diodo polarizado en directa sin romperse por Efecto Joule (**I_F** : Max. Forward Current)
- **Tensión de codo:** Diferencia de potencial mínima necesaria para que el diodo actúe como conductor en lugar de circuito abierto. (**V_F** : Forward Voltage)
- **Corriente inversa de saturación:** Es la pequeña corriente que se establece al polarizar inversamente el diodo (**I_S ó I_r** : Reverse Current)
- **Tensión inversa máxima o de ruptura:** Diferencia de potencial a partir de la cual se produce la ruptura de la unión por avalancha (**V_R** : Max. Reverse Voltage)

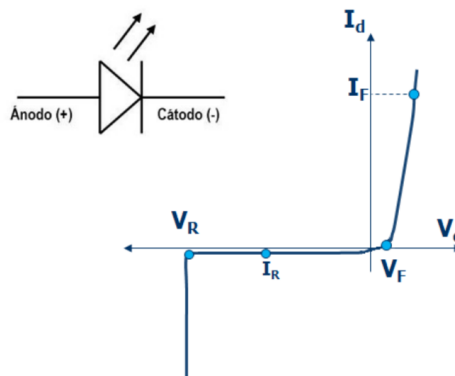


Figura 110. Símbolo estándar Diodo LED y curva característica V-I [50]

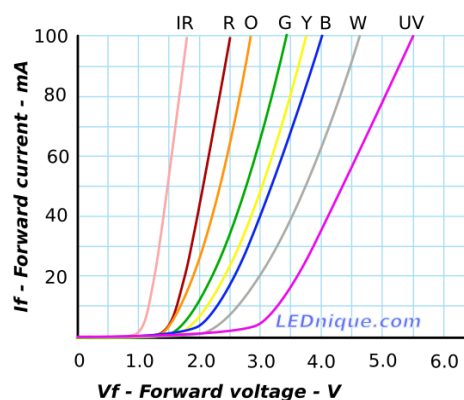


Figura 111. Curva V-I LED por colores [6]

2. OBJETO DE LA PRÁCTICA

- ☐ Analizar las características de los LED con sus datasheet
- ☐ Calcular los valores de los componentes necesarios para el regulador más simple, electrónicamente hablando, la resistencia.
- ☐ Montar los circuitos propuestos
- ☐ Simular los circuitos montados
- ☐ Contrastar los datos teóricos, experimentales y simulados

3. DESCRIPCIÓN BÁSICA

Analizar las hojas de características de los LED con el fin de obtener la información necesaria para los cálculos.

Montar un circuito regulador con el elemento pasivo más simple, la resistencia, en el laboratorio para realizar las medidas de tensión e intensidad, con el fin de parametrizar la curva V-I del LED blanco y encontrar la tensión del LED para cada uno de ellos en sus condiciones nominales.

Afianzar los datos obtenidos, montar un circuito serie y otro paralelo con los LED y calcular sus resistencias limitadoras

Simular con “Pspice” los circuitos serie y paralelo

4. LISTADO DE MATERIAL

- ☐ Fuente de alimentación DC 30V 3A
- ☐ Multímetro precisión igual o mayor al 0,1%
- ☐ LED azul, rojo y blanco de 20mA.
- ☐ Resistencias serie E12.

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

5.1. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA

En esta primera práctica vamos a realizar los cálculos previos y montajes necesarios para conocer la curva V-I de diferentes tipos de led, organizados por color y tipo de encapsulado.

Montaremos un circuito con la topología de la imagen posterior, calcularemos la resistencia limitadora para su I_F del LED y su diferencia de potencial dependiendo del color.

Color	Tensión umbral
Rojo	1.9v
Amarillo	1.7v a 2v
Verde	2.4v
Naranja	2.4v
Blanco	3.4v
Azul	3.4v

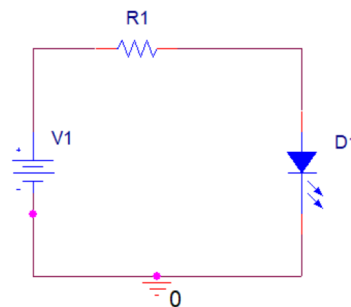


Figura 112. Tensión umbral por colores[12]

Figura 113. Circuito serie LED

$$R_{LIM} = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_F}; V_{LED} = V_{CC} - R \cdot I_F$$

La actividad se realizará siguiendo el esquema del circuito superior, dando valores a la fuente de tensión hasta alcanzar en el circuito una corriente de 20mA y un valor de 1k Ω para la resistencia.

	ROJO	VERDE	AZUL	BLANCO
V_{LED} TEÓRICA (V)	1.9V	2.4V	3.4V	3.4V
V_{LED} MEDIDA (V)	2.09V	3.555V	3.0V	3.02V
R_{LIM} TEÓRICA (Ω)	1000	1000	1000	1000
R_{LIM} MEDIDA (Ω)	992	992	992	992
I_F TEÓRICA (mA)	20	20	20	20
I_F MEDIDA (mA)	20.50	20.07	20	20.01

Curva V-I

Realizar un barrido de tensión desde 0V hasta la tensión de alimentación hallada en el apartado anterior. Medir tensión y corriente en el LED en cada uno de los siguientes valores y realizar curva V-I del diodo. Con al menos uno de los colores.

LED BLANCO

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
0	0	0	12,5	2,869	9,66
1	0,98	0	13	2,878	10,16
2	1,96	0	13,5	2,886	10,64
3	2,604	0,42	14	2,894	11,15
3,5	2,658	0,82	14,5	2,903	11,67
4	2,664	1,34	15	2,911	12,19
4,5	2,678	1,84	15,5	2,918	12,65
5	2,695	2,29	16	2,917	13,20
5,5	2,711	2,77	16,5	2,933	13,67
6	2,727	3,28	17	2,941	14,17
6,5	2,741	3,74	17,5	2,948	14,66
7	2,756	4,25	18	2,955	15,17
7,5	2,768	4,74	18,5	2,962	15,69
8	2,780	5,24	19	2,968	16,18
8,5	2,791	5,71	19,5	2,974	16,60
9	2,803	6,20	20	2,978	17,11
9,5	2,813	6,69	20,5	2,985	17,57
10	2,824	7,19	21	2,991	18,18
10,5	2,834	7,71	21,5	3,000	18,64
11	2,843	8,18	22	3,006	19,11
11,5	2,851	8,73	22,5	3,011	19,70
12	2,860	9,16	23	3,017	20,18

Insertar tabla V-I realizada a ordenador:

CURVA V-I

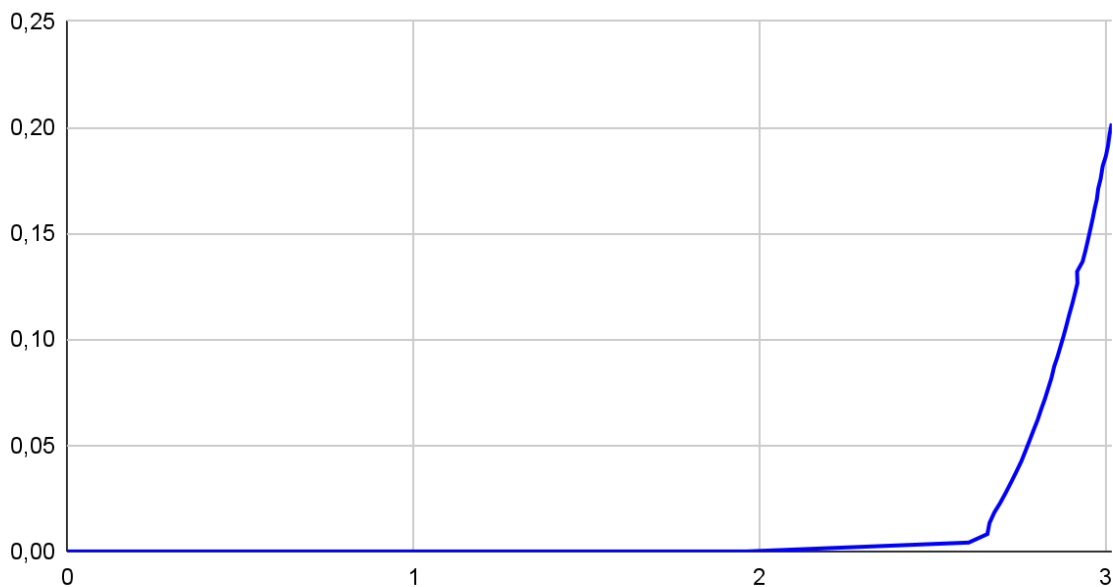


Figura 114. Curva V-I LED Blanco

En ésta gráfica se ha representado la curva característica del LED blanco, como sabíamos, una vez superada la tensión de codo la corriente se convierte en exponencial.

Tensión y corriente en LED según alimentación

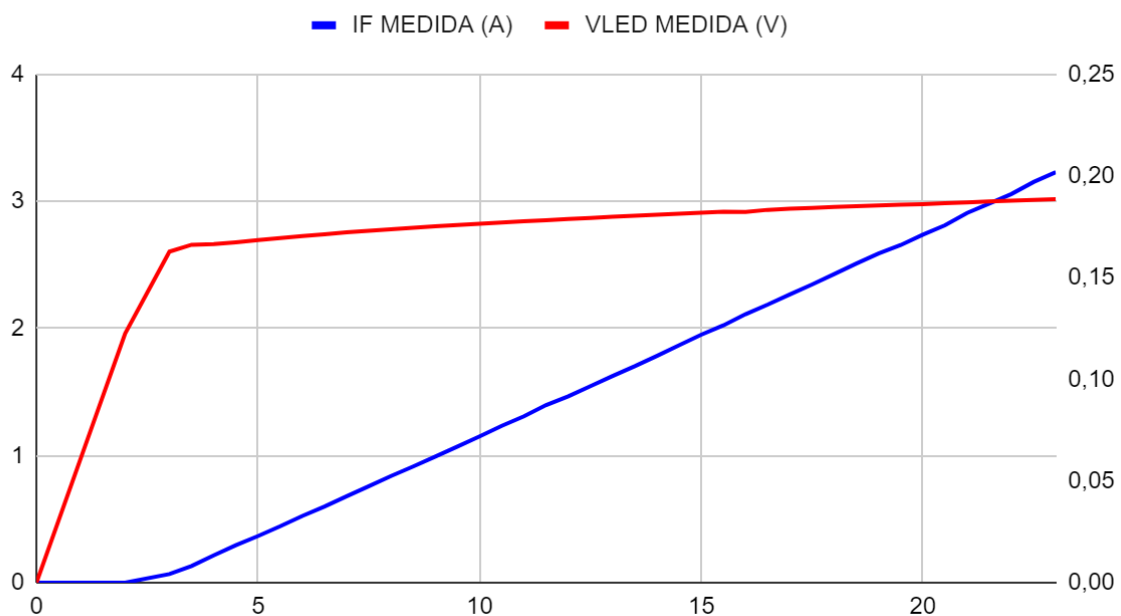


Figura 115. Comportamiento de la corriente frente tensión del LED

En la segunda gráfica se puede ver reflejado el comportamiento del LED frente a la tensión de alimentación, se distingue su tensión de codo, aproximadamente 2.6V, a partir de entonces su incremento de tensión en bornes muy bajo, del orden de 10 mV y por contrario, la corriente que antes era constante en 0 comienza a aumentar linealmente.

5.2. SERIE

Una vez conocida la tensión de cada uno de los 3 LED utilizados, hay que realizar el cálculo de la resistencia teniendo en cuenta que su disposición será en serie.

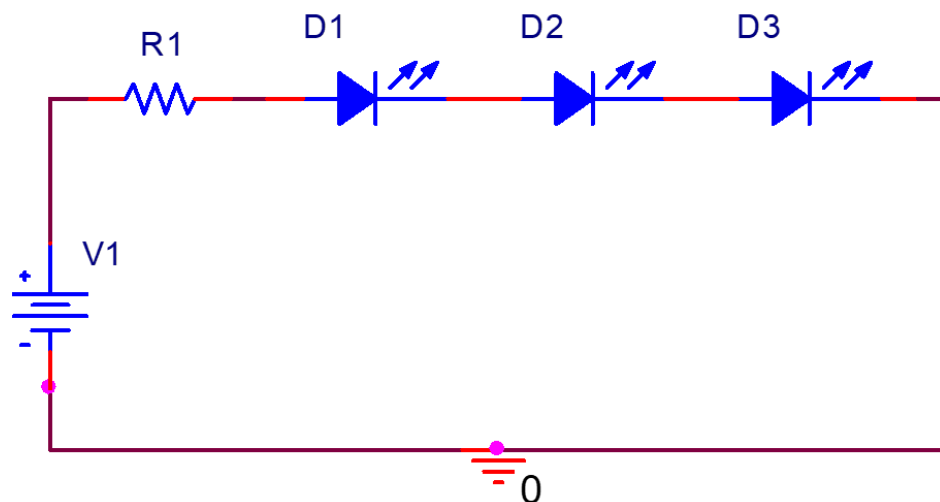


Figura 116. Circuito serie multiLED

Con 4 led de los utilizados anteriormente, realizamos el cálculo para el circuito expuesto y la tensión del LED a aplicar hay que considerar la suma de las 3 tensiones halladas en la actividad anterior.

Parámetros a considerar: **V_{cc}=20V**

	ROJO	VERDE	AZUL	BLANCO
V _{LED} TEÓRICA (V)	2,09	3,555	3,0	3,02
V _{LED} MEDIDA (V)	11,63			
R _{LIM} TEÓRICA (Ω)	$\frac{V_{cc} - \sum V_{LED}}{I_{LED}} = 416,75\Omega \rightarrow \text{Val. Comerciales: } 390\Omega \text{ o } 470\Omega$			
R _{LIM} MEDIDA (Ω)	468			
I _F TEÓRICA (mA)	20			
I _F MEDIDA (mA)	20,06			

5.3. PARALELO

Para terminar la caracterización del LED y sus diversos montajes, realizaremos un montaje paralelo con los 3 LED del color cualquiera que hemos utilizado anteriormente. Calcular el valor de su resistencia limitadora, al igual que se ha realizado en el apartado anterior pero con las tensiones de LED y de línea correspondientes a cada rama.

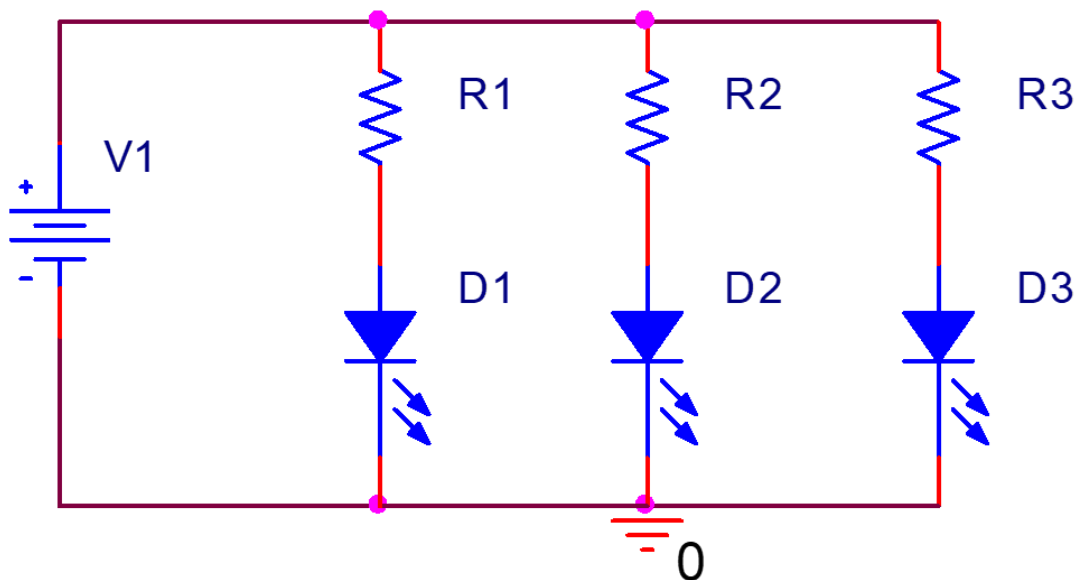


Figura 117. Circuito paralelo LED

Parámetros a considerar: $V_{cc}=20V$

	ROJO	VERDE	AZUL
V_{LED} ACT. 1	1.9V	2.4V	3.4V
V_{LED} MEDIDA	2.02V	2.1V	3.0V
R_{LIM} TEÓRICA	905	880	830
R_{LIM} MEDIDA	989,7	986,5	815,3
IF TEÓRICA	$20 \times 10^{-3} mA$		
IF MEDIDA	18,10	17,31	20,6

5.4. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA PARA LED DE POTENCIA (1W)

Los LED de potencia son aquellos que tienen una potencia igual o superior a 1W, vamos a realizar un rápido ejercicio de encendido y medición de consumo de corriente.



Tener en cuenta que la corriente máxima de dicho LED varía respecto a los de baja potencia. Buscar en su hoja de características la corriente límite y calcular la resistencia limitadora con ese dato, luego montar el circuito y rellenar la tabla. (No apuntar el LED a los ojos).

Ajustar el valor de la fuente de alimentación a un valor óhmico de la resistencia limitadora que sea comercial.

	LED 1W
V_{LED} TEÓRICA (V)	3,0
V_{LED} MEDIDA (V)	3,238
R_{LIM} TEÓRICA (Ω)	33,3 Ω / 1W
R_{LIM} MEDIDA (Ω)	9,5
I_F TEÓRICA (mA)	300
I_F MEDIDA (mA)	297,11

6. SIMULACIONES CON PSpICE

Realizar las simulaciones de los circuitos serie y paralelo en pspice usando los modelos LED OSRAM_5MMRADIAL, agregar evidencias del esquemático y de los resultados obtenidos.

Buscar hoja de características de cada LED, para LA_541B, LW_541C, LB_543C y LS_5436.

Aplicando la siguiente fórmula se calcula la resistencia limitadora para los LED, en el caso de la topología paralela, habrá que usar una resistencia para cada LED.

$$\frac{V_{cc} - V_{LED}}{I_{LED}} = R_{LIM}$$

DATASHEET**LS 5436, LO 5436, LY 5436****Kennwerte**
Characteristics
($T_A = 25\text{ °C}$)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Werte Values			Einheit Unit
		LS	LO	LY	
Wellenlänge des emittierten Lichtes (typ.) Wavelength at peak emission $I_F = 20\text{ mA}$	λ_{peak}	645	610	591	nm
Dominantwellenlänge ^{6) Seite 13} (min.) Dominant wavelength ^{6) page 13} (typ.) $I_F = 20\text{ mA}$ (max.)	λ_{dom} λ_{dom} λ_{dom}	627 633 639	600 606 609	583 587 592	nm nm nm
Spektrale Bandbreite bei 50 % $I_{\text{rel max}}$ Spectral bandwidth at 50 % $I_{\text{rel max}}$ $I_F = 20\text{ mA}$	$\Delta\lambda$	16	16	15	nm
Abstrahlwinkel bei 50 % I_V (Vollwinkel) Viewing angle at 50 % I_V	2φ	40	40	40	Grad deg.
Durchlassspannung ^{7) Seite 13} (typ.) Forward voltage ^{7) page 13} (max.) $I_F = 20\text{ mA}$	V_F V_F	2.0 2.4	2.0 2.4	2.0 2.4	V V

Figura 118. Extracto datasheet [46]

Typ Type	Emissions- farbe Color of Emission	Gehäusefarbe Color of Package	Partieller Lichtfluss ^{1) Seite 13} Partial Flux ^{1) page 13} $I_F = 20\text{ mA}$ $E_V [\text{lux}]$
LS 5436-UAW-1	super-red	colorless clear	450 ... 1800

Figura 119. Extracto datasheet [46]

DATASHEET**LB 543C, LV 543C, LT 543C****Kennwerte**
Characteristics
($T_A = 25\text{ °C}$)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Werte Values			Einheit Unit
		LB	LV	LT	
Wellenlänge des emittierten Lichtes (typ.) Wavelength at peak emission $I_F = 20\text{ mA}$	λ_{peak}	465	503	523	nm
Dominantwellenlänge ⁶⁾ Seite 15 (min.) Dominant wavelength ⁶⁾ page 15 (typ.) $I_F = 20\text{ mA}$ (max.)	λ_{dom} λ_{dom} λ_{dom}	464 470 476	505 ± 7	517 528 537	nm nm nm
Spektrale Bandbreite bei 50 % $I_{\text{rel max}}$ Spectral bandwidth at 50 % $I_{\text{rel max}}$ $I_F = 20\text{ mA}$	$\Delta\lambda$	25	30	33	nm
Abstrahlwinkel bei 50 % I_V (Vollwinkel) Viewing angle at 50 % I_V	2φ	26	26	26	Grad deg.
Durchlassspannung ⁷⁾ Seite 15 (typ.) Forward voltage ⁷⁾ page 15 (max.) $I_F = 20\text{ mA}$	V_F V_F	3.6 4.1	3.5 4.1	3.5 4.1	V V

Figura 120. Extracto datasheet [47]

Typ Type	Emissions- farbe Color of Emission	Gehäusefarbe Color of Package	Partieller Lichtfluss ¹⁾ Seite 15 Partial Flux ¹⁾ page 15 $I_F = 20\text{ mA}$ $E_V [\text{lux}]$	Lichtstrom ²⁾ Seite 15 Luminous Flux ²⁾ page 15 $I_F = 20\text{ mA}$ $\Phi_V (\text{mlm})$
LB 543C-UV-1 LB 543C-VAW-35	blue	colorless clear	450 ... 1120 710 ... 1800	165 (typ.) 260 (typ.)

Figura 121. Extracto datasheet [47]

DATASHEET**LW 541C****Kennwerte**
Characteristics
($T_A = 25\text{ °C}$)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Farbkoordinate x nach CIE 1931 ⁶⁾ Seite 14 Chromaticity coordinate x acc. to CIE 1931 ⁶⁾ page 14 $I_F = 20\text{ mA}$	x	0.32	—
Farbkoordinate y nach CIE 1931 ⁶⁾ Seite 14 Chromaticity coordinate y acc. to CIE 1931 ⁶⁾ page 14 $I_F = 20\text{ mA}$	y	0.31	—
Abstrahlwinkel bei 50 % I_V (Vollwinkel) Viewing angle at 50 % I_V	2 φ	20	Grad deg.
Durchlassspannung ⁷⁾ Seite 14 (min.) Forward voltage ⁷⁾ page 14 (typ.) $I_F = 20\text{ mA}$ (max.)	V_F V_F V_F	3.0 3.6 4.1	V V V

Figura 122. Extracto datasheet [48]

Typ Type	Emissions- farbe Color of Emission	Gehäuse- farbe Color of Package	Partieller Lichtfluss ¹⁾ Seite 14 Partial Flux ¹⁾ page 14 $I_F = 20\text{ mA}$ E_V [lux]	Lichtstrom ²⁾ Seite 14 Luminous Flux ²⁾ page 14 $I_F = 20\text{ mA}$ Φ_V (lm)
■ LW 541C-AWBW-6K9L	white	colorless	1120 ...2800	820(typ.)
■ LW 541C-BWDW-6K9L		clear	1800 ...7100	1870(typ.)
■ LW 541C-AWDW-6K9L			1120 ...7100	1725(typ.)

Figura 123. Extracto datasheet [48]

DATASHEET**LA 541B, LO 541B, LY 541B****Kennwerte**
Characteristics
($T_A = 25\text{ °C}$)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Werte Values			Einheit Unit
		LA	LO	LY	
Wellenlänge des emittierten Lichtes (typ.) Wavelength at peak emission $I_F = 20\text{ mA}$	λ_{peak}	624	610	594	nm
Dominantwellenlänge ^{6) Seite 13} (min.) Dominant wavelength ^{6) page 13} (typ.) $I_F = 20\text{ mA}$ (max.)	λ_{dom} λ_{dom} λ_{dom}	612 617* 624	600 606* 609	580 587* 595	nm nm nm
Spektrale Bandbreite bei 50 % $I_{\text{rel max}}$ Spectral bandwidth at 50 % $I_{\text{rel max}}$ $I_F = 20\text{ mA}$	$\Delta\lambda$	18	16	15	nm
Abstrahlwinkel bei 50 % E_V (Vollwinkel) Viewing angle at 50 % E_V	2φ	15	15	15	Grad deg.
Durchlassspannung ^{7) Seite 13} (min.) Forward voltage ^{7) page 13} (typ.) $I_F = 20\text{ mA}$ (max.)	V_F V_F V_F	1.8 2.0 2.4	1.8 2.0 2.4	1.8 2.0 2.4	V V V

Figura 124. Extracto datasheet [49]

Typ	Emissions- farbe	Gehäuse- farbe	Partieller Lichtfluss ¹⁾ Seite 13	Lichtstrom ²⁾ Seite 13
Type	Color of Emission	Color of Package	Partial Flux ¹⁾ page 13	Luminous Flux ²⁾ page 13
			$I_F = 20\text{ mA}$ E_V [lux]	$I_F = 20\text{ mA}$ Φ_V (lm)
LA 541B-AWBW-24	amber	colorless clear	1120 ... 2800	630 (typ.)
LA 541B-BWDW-24			1800 ... 7100	1425 (typ.)
LA 541B-AWDW-24			1120 ... 7100	1315 (typ.)

Figura 125. Extracto datasheet [49]

6.1. SIMULACIÓN SERIE

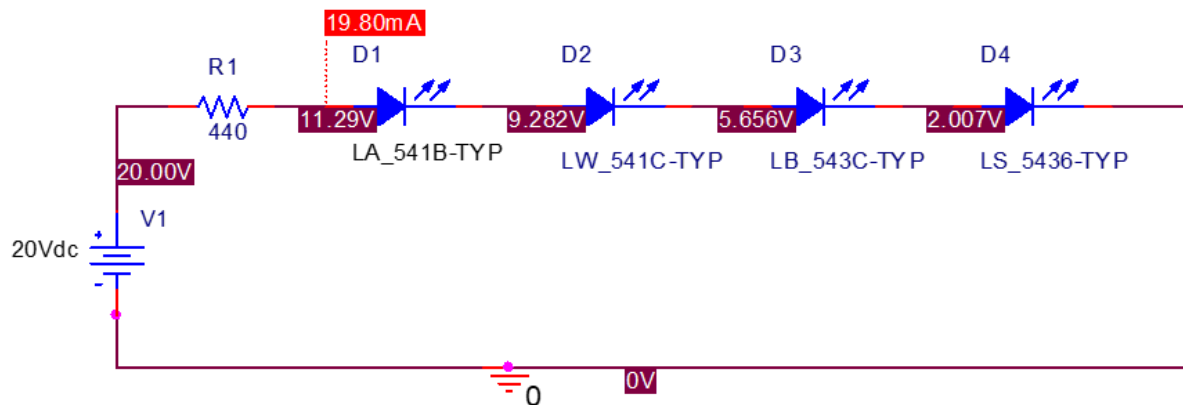


Figura 126. Circuito serie simulado pspice

Debido a la caída de tensión en la resistencia, se observa que la corriente calculada con la suma de tensiones de cada LED y su corriente límite $20 \times 10^{-3}mA$ no se alcanza dicho valor

6.2. SIMULACIÓN PARALELO

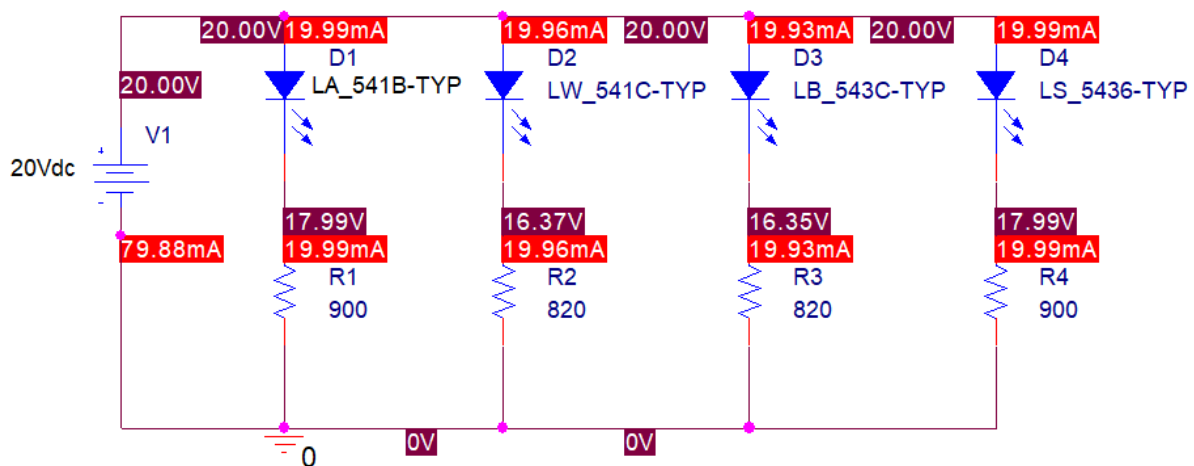


Figura 127. Circuito paralelo simulado PSpice.

7. CONCLUSIONES

Es apreciable que en el laboratorio, teniendo unos LED identificados con su código para poder revisar su datasheet, sería más fácil realizar una aproximación a lo simulado. Una opción sería realizar la curva V-I de todos los LED que vamos a usar en el laboratorio y posteriormente parametrizar nuevos modelos en PSPICE, al realizar la simulación los resultados serían más que parecidos a la realidad.

En los cálculos para la resistencia limitadora nunca incluyen la caída de tensión en la resistencia, valor que en la simulación si es considerado.

Aún así se arrojan valores bastantes cercanos entre realidad y simulación que permiten considerar válidos los valores del laboratorio.

Práctica 1. CARACTERIZACIÓN DEL LED

1. INTRODUCCIÓN

El símbolo y la característica V-I para los diodos LED se esquematiza en la siguiente figura. Donde se muestran los parámetros característicos de los diodos:

- **Corriente máxima:** Máxima corriente que soporta el diodo polarizado en directa sin romperse por Efecto Joule (**I_F** : Max. Forward Current)
- **Tensión de codo:** Diferencia de potencial mínima necesaria para que el diodo actúe como conductor en lugar de circuito abierto. (**V_F** : Forward Voltage)
- **Corriente inversa de saturación:** Es la pequeña corriente que se establece al polarizar inversamente el diodo (**I_S ó I_R** : Reverse Current)
- **Tensión inversa máxima o de ruptura:** Diferencia de potencial a partir de la cual se produce la ruptura de la unión por avalancha (**V_R** : Max. Reverse Voltage)

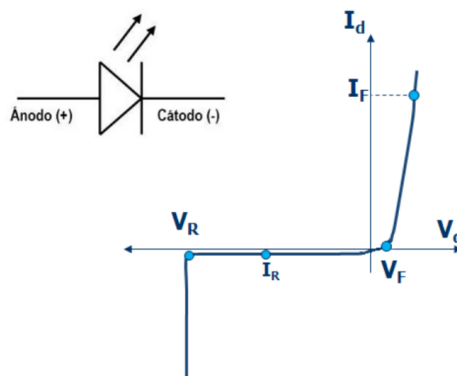


Figura 128. Símbolo estándar Diodo LED y curva característica V-I [50]

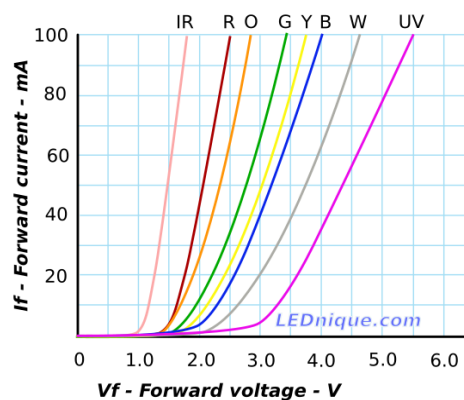


Figura 129. Curva V-I LED por colores [6]

OBJETO DE LA PRÁCTICA

- ☐ Analizar las características de los LED con sus datasheet
- ☐ Calcular los valores de los componentes necesarios para el regulador más simple, electrónicamente hablando, la resistencia.
- ☐ Montar los circuitos propuestos
- ☐ Simular los circuitos montados
- ☐ Contrastar los datos teóricos, experimentales y simulados

2. DESCRIPCIÓN BÁSICA

Analizar las hojas de características de los LED con el fin de obtener la información necesaria para los cálculos.

Montar un circuito regulador con el elemento pasivo más simple, la resistencia, en el laboratorio para realizar las medidas de tensión e intensidad, con el fin de parametrizar la curva V-I del LED blanco y encontrar la tensión del LED para cada uno de ellos en sus condiciones nominales.

Afianzar los datos obtenidos, montar un circuito serie y otro paralelo con los LED y calcular sus resistencias limitadoras

Simular con “Pspice” los circuitos serie y paralelo

3. LISTADO DE MATERIAL

- ☐ Fuente de alimentación DC 30V 3A
- ☐ Multímetro precisión igual o mayor al 0,1%
- ☐ LED azul, rojo y blanco de 20mA.
- ☐ Resistencias serie E12.

4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

4.1. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA

Realizar los cálculos previos y montajes necesarios para conocer la curva V-I de los diferentes tipos de led según su color

Montar el circuito semejante a la imagen siguiente, calcular la resistencia limitadora para su I_F del LED y su diferencia de potencial dependiendo del color.

Color	Tensión umbral
Rojo	1.9v
Amarillo	1.7v a 2v
Verde	2.4v
Naranja	2.4v
Blanco	3.4v
Azul	3.4v

Figura 130. Tensión umbral por colores[12]

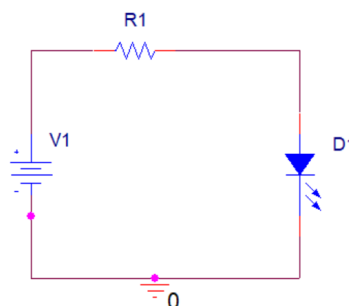


Figura 131. Circuito serie LED

$$R_{LIM} = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_F}; V_{LED} = V_{CC} - R \cdot I_F$$

Siguiendo el esquema de la FIGURA 123, dar valores a la fuente de tensión hasta alcanzar en el circuito una corriente de 20mA, el valor de la resistencia de 1kΩ.

	ROJO	VERDE	AZUL	BLANCO
V_{LED} TEÓRICA (V)				
V_{LED} MEDIDA (V)				
R_{LIM} TEÓRICA (Ω)	1000	1000	1000	1000
R_{LIM} MEDIDA (Ω)				
I_F TEÓRICA (mA)	20	20	20	20
I_F MEDIDA (mA)				

Curva V-I

Realizar un barrido de tensión desde 1V hasta la tensión de alimentación hallada en el apartado anterior. Medir tensión y corriente en el LED en cada uno de los valores y realizar curva V-I del diodo.

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
0			12,5		
1			13		
2			13,5		
3			14		
3,5			14,5		
4			15		
4,5			15,5		
5			16		
5,5			16,5		
6			17		
6,5			17,5		
7			18		
7,5			18,5		
8			19		
8,5			19,5		
9			20		
9,5			20,5		
10			21		
10,5			21,5		
11			22		
11,5			22,5		
12			23		

Insertar tabla V-I realizada a ordenador



4.2. SERIE

Una vez conocida la tensión de cada uno de los 3 LED utilizados, hay que realizar el cálculo de la resistencia teniendo en cuenta que su disposición será en serie.

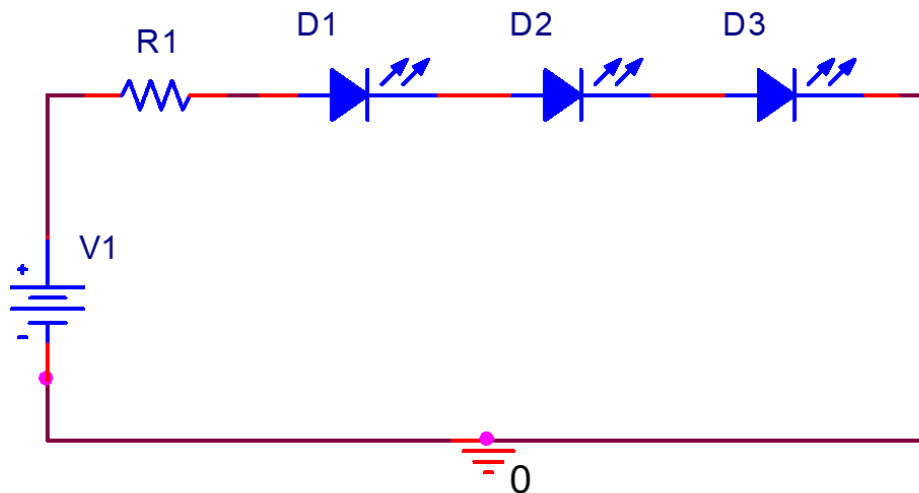


Figura 132. Circuito serie LED.

Con 3 led de los utilizados anteriormente, realizamos el cálculo con el circuito superior y la tensión del LED a aplicar hay que considerar la suma de las 3 tensiones halladas en la actividad anterior.

Parámetros a considerar: **Vcc=20V**

	ROJO	VERDE	AZUL
V_{LED} ACT. 1			
V_{LED} MEDIDA			
R_{LIM} TEÓRICA			
R_{LIM} MEDIDA			
I_F TEÓRICA			
I_F MEDIDA			

4.3. PARALELO

Para terminar la caracterización del LED y sus diversos montajes, realizaremos un montaje paralelo con los 3 LED del color cualquiera que hemos utilizado anteriormente. Calcular el valor de su resistencia limitadora, al igual que se ha realizado en el apartado anterior pero con las tensiones de LED y de línea correspondientes a cada rama.

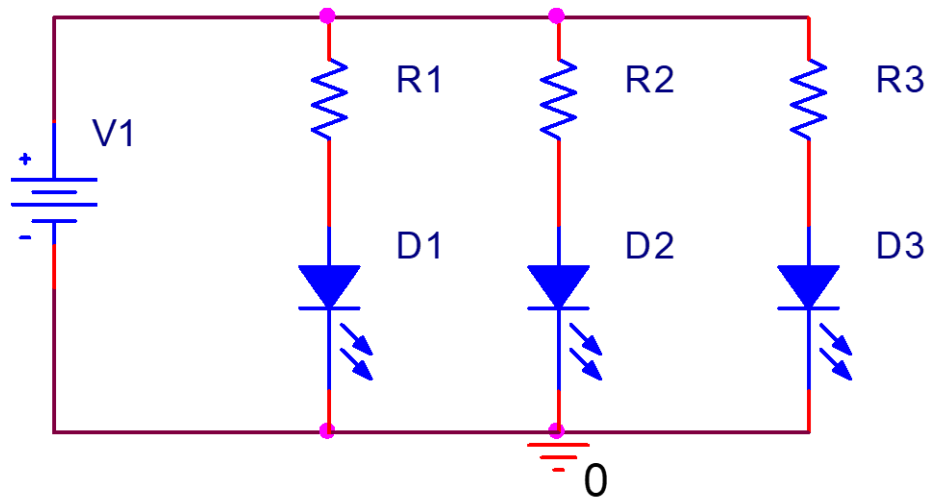


Figura 133 Circuito paralelo LED

Parámetros a considerar: **Vcc=20V**

	ROJO	VERDE	AZUL
V_{LED} ACT. 1			
V_{LED} MEDIDA			
R_{LIM} TEÓRICA			
R_{LIM} MEDIDA			
IF TEÓRICA			
IF MEDIDA			

4.4. CARACTERIZACIÓN LED Y CÁLCULO DE RESISTENCIA LIMITADORA PARA LED DE POTENCIA (1w)

Los LED de potencia son aquellos que tienen una potencia igual o superior a 1W, vamos a realizar un rápido ejercicio de encendido y medición de consumo de corriente.



Tener en cuenta que la corriente máxima de dicho LED varía respecto a los de baja potencia. Buscar en su hoja de características la corriente límite y calcular la resistencia limitadora con ese dato, luego montar el circuito y rellenar la tabla. (No apuntar el LED a los ojos)

Ajustar el valor de la fuente de alimentación a un valor óhmico de la resistencia limitadora que sea comercial.

	LED 1W
V_{LED} TEÓRICA	
V_{LED} MEDIDA	
R_{LIM} TEÓRICA	
R_{LIM} MEDIDA	
I_F TEÓRICA	
I_F MEDIDA	

5. SIMULACIONES CON PSpICE

Realizar las simulaciones de los circuitos serie y paralelo en pspice usando los modelos LED OSRAM_5MMRADIAL, agregar evidencias del esquemático y de los resultados obtenidos.

6. CONCLUSIONES

Realizar una comparativa entre los resultados del laboratorio y los obtenidos en las simulaciones.

Práctica 2. FUENTE LINEALES DE CORRIENTE PROFESOR

1. INTRODUCCIÓN

Como hemos visto en la teoría, el LED es controlado por corriente, motivo por el cual el material de ésta práctica son varios circuitos reguladores de corrientes y se introducirá el concepto de dimming.

Analizar los circuitos propuestos a través de sus cálculos que comprobaremos si son correctos con una simulación en el software ORCAD PSPICE y realizando su montaje experimental en laboratorio.

2. OBJETO DE LA PRÁCTICA

- ☐ Analizar y calcular los circuitos reguladores lineales.
- ☐ Profundizar en el aprendizaje del comportamiento de los LEDs.
- ☐ Aprender la importancia de los sistemas realimentados para obtener circuitos estables.
- ☐ Simular y comprobar el correcto comportamiento de los circuitos experimentados frente a las circuitos simulados

3. DESCRIPCIÓN BÁSICA

La práctica consta de 2 circuitos diferentes:

El primero de ellos consta de dos transistores Q2N2222 que corresponde con el transistor BC547, un LED y dos resistencias.

La corriente que atraviesa el LED se mantiene constante en los valores resultantes de la tensión base-emisor del transistor entre la resistencia RLED.

La resistencia RLED proporciona la corriente de polarización requerida para el segundo transistor y la corriente de colector de Q1.

Si la corriente por Q2 es fluctuante, la corriente por Q1 actuaría igual, en caso de aumentar, ambas aumentan y esto provoca que disminuya la corriente en la base de Q2 alcanzando un equilibrio.

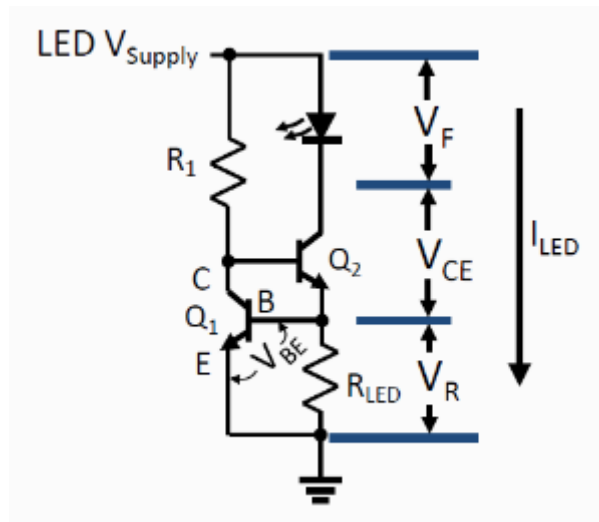


Figura 134. Transistores polarizados

El segundo circuito está formado por dos resistencias, un diodo zener y un transistor, en el colector del transistor está ubicado el LED que tiene que ser alimentado. La corriente que circula a través del mismo LED y por tanto, la corriente de colector, se mantienen constantes dado que la tensión base emisor del transistor se mantiene constante por el diodo zener.

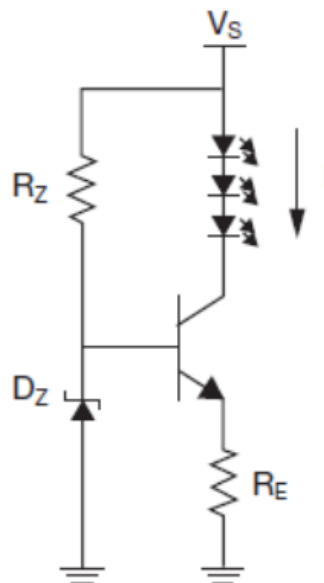


Figura 135. Transistor polarizado con D. Zener

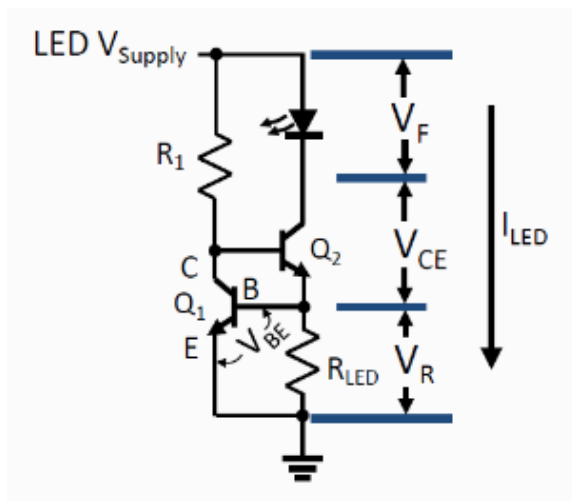
Analizar ambos circuitos en los siguientes apartados.

4. LISTADO DE MATERIAL

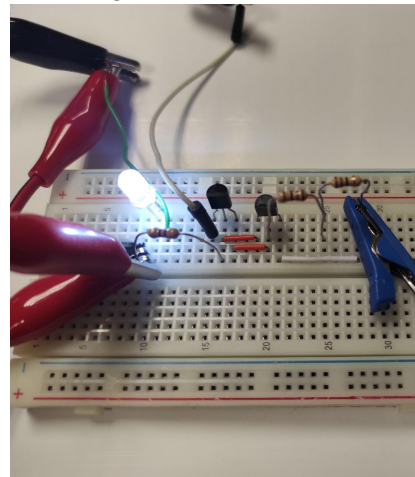
- ☐ Fuente de alimentación DC 30V 3A
- ☐ Multímetro precisión igual o mayor al 0,1%
- ☐ LED azul, rojo y blanco de 20mA.
- ☐ Generador de funciones
- ☐ Transistores BC547 (NPN)
- ☐ Diodos ZENER 3_3 o 5_1
- ☐ Resistencias serie E12.

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

5.1. CIRCUITO 1



Introducir fotografía del circuito montado:



Una vez realizados los cálculos de las resistencias (Introducir demostración en el siguiente recuadro para el primer circuito)

Con el transistor en región activa se desarrolla un conjunto de ecuaciones por el cual se halla el valor de corriente de colector I_{Q2} , que a su vez es la corriente que circula por el LED.

$$I_E = (1 + \beta_F) \times I_B = I_C + I_B$$

$$I_C = \beta \times I_B$$

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) \div (R_{TH} + R_E(1 + \beta_F))$$

Se puede considerar $R_E(1 + \beta_F) \gg R_{TH}$; $\beta_F \gg 1$ y por ello también se considera despreciable I_B

Aplicando las Leyes de Kirchhoff

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_C - I_E \times R_E \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_C - I_E \times R_E$$

$$I_C = (V_{CC} - V_{BE}) \div R_E$$

Con la topología del circuito se deduce que la tensión que circula por la resistencia de emisor Q2 es V_{BE} de Q1 y por consiguiente la corriente una vez excitado el circuito es constante $\rightarrow I_B$ despreciable $\rightarrow I_{C2} = V_{BE1} \div R_{LED}$

El sentido de R_1 en el circuito es proteger a Q1 en corriente y resulta de la ecuación por Kirchhoff:

$$V_{CC} - 2V_{BE} = I_{C1} \times R_1 + I_{B2} \times R_1$$

$$I_{C1} = (V_{CC} - 2V_{BE}) \div R_1$$

Valores de resistencia en circuito para 20mA por el LED y corriente de colector máxima 100mA ([Datasheet BC547](#)):

$$R_{LED} = 36,3\Omega \rightarrow 36\Omega \text{ 2x18}\Omega \text{ usada en laboratorio}$$

$$R_{1MIN} = 193\Omega \rightarrow 470\Omega \text{ usada en laboratorio}$$

Hacer un barrido de tensiones y comprobar la corriente que circula por los LED, analizar su comportamiento y justificar si igual al resultado que esperábamos

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
0	0,0000	0,0000	7,5	3,2265	0,0182
0,5	0,4620	0,0000	8	3,2305	0,0182
1	0,9430	0,0000	8,5	3,2360	0,0184
1,5	1,3870	0,0000	9	3,1805	0,0184
2	1,8530	0,0000	9,5	3,1805	0,0185
2,5	2,3150	0,0000	10	3,1795	0,0186
3	2,6940	0,0017	10,5	3,1830	0,0186
3,5	2,9275	0,0065	11	3,1815	0,0187

4	3,1480	0,0122	11,5	3,1855	0,0187
4,5	3,2525	0,0179	12	3,1895	0,0188
5	3,2050	0,0180	12,5	3,1915	0,0188
5,5	3,2365	0,0181	13	3,1935	0,0189
6	3,2380	0,0180	13,5	3,1955	0,0190
6,5	3,2390	0,0180	14	3,1975	0,0190
7	3,2400	0,0186	14,5	3,1970	0,0191

Representar en el gráfico inferior los datos obtenidos y cumplimentados en la tabla.

Fuente de corriente 2 transistores

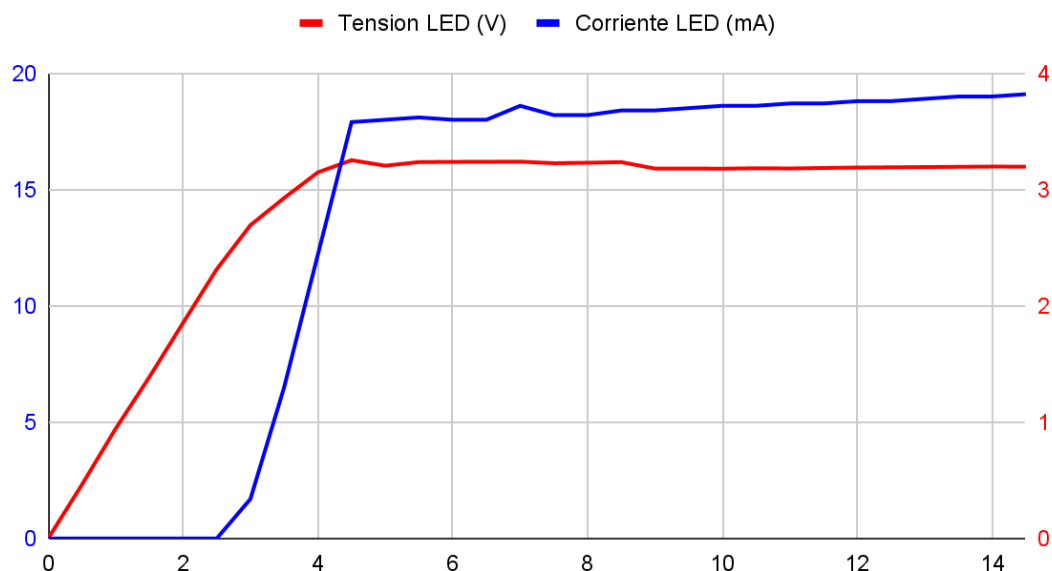
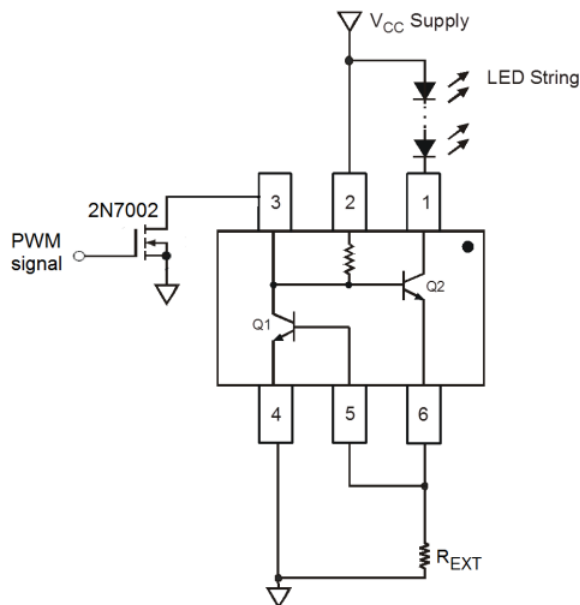
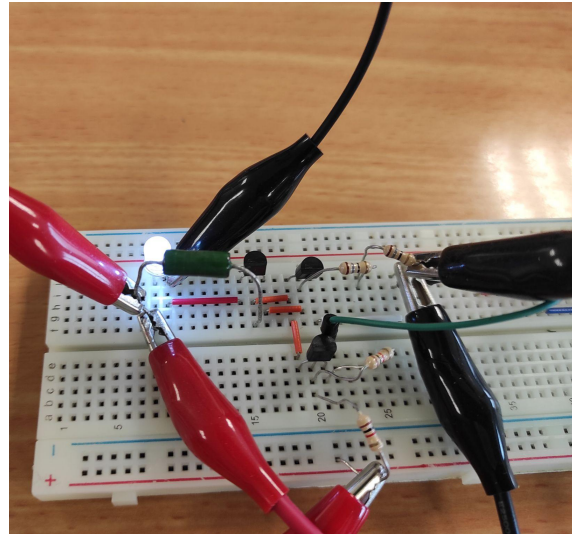


Figura 136. Comportamiento V-I LED incrementando tensión de la fuente

Antes de desmontar el circuito vamos a probar el concepto del DIMMING, ¿qué sucedería si agregamos una señal PWM en la base de Q2 / colector de Q1?. Realizar el montaje y comprobar variando el ancho de pulso de la señal lo que sucede en el LED.

5.2. CIRCUITO 2

Introducir imagen del circuito montado:



Como se aprecia en la imagen tipo, necesitaremos un transistor adicional a los ya usados en el montaje, en éste caso usaremos uno de tipo MOSFET, el cuál nos permite excitar por tensión. Además vamos a usar el generador de señales para una señal pulsante $V_{\text{máx}}$ 5V y V_{min} 0V y una frecuencia aproximada de 10kHz.

Analizar el comportamiento del circuito, ¿A mayor PWM mayor corriente por el led o a mayor PWM menos corriente por el LED?, demostrar su funcionamiento.

El generador de funciones sólo nos permite variar el PWM entre 20% y 80% así que tomaremos la corriente que circula por los LED con los diferentes valores.

Tensión aliment. (V)	PWM (%)	IF MEDIDA (mA)
12	0	20,8
12	20	16,9
12	30	14,8
12	40	12,7
12	50	10,57
12	60	8,45
12	70	6,34
12	80	4,23
12	100	0

Caída de corriente con PWM

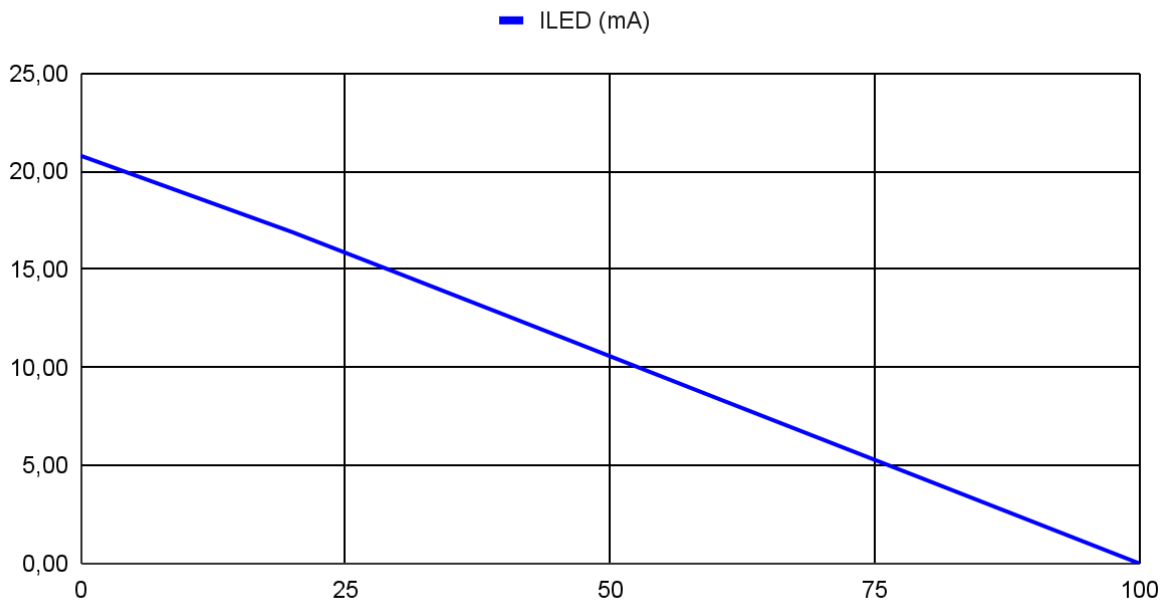
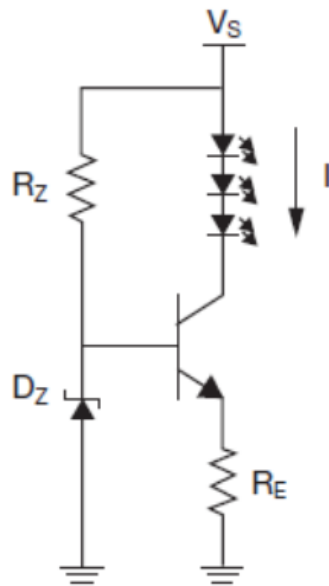
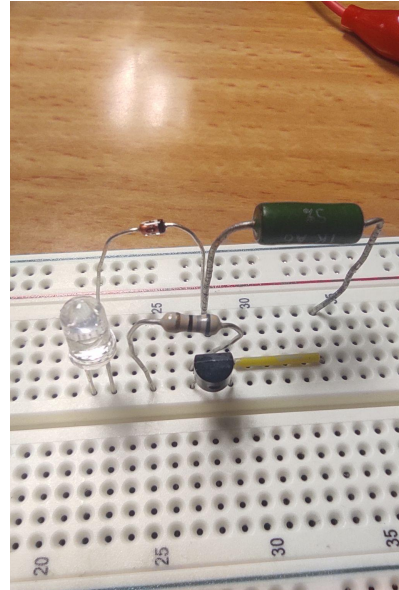


Figura 137. Corriente LED a diferentes tiempos de ciclo

5.3. CIRCUITO 3



Introducir fotografía del circuito montado:



Una vez realizados los cálculos de las resistencias (Introducir demostración en el siguiente recuadro para el primer circuito)

Partiendo de las fórmulas obtenidas del primer apartado, se obtienen rápidamente los resultados para las resistencias de emisor y la resistencia de protección del diodo Zener.

La tensión que circula por la resistencia emisor es la diferencia entre la tensión del D.Zener y la tensión base-emisor del transistor

$$R_E = (V_Z - V_{BE}) \div I_{C1} = (5,1 - 0,7)/0,02 = 220\Omega$$

Para el valor de resistencia de protección del D.Zener, es necesario conocer su corriente máxima ([DATASHEET](#))



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T _{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Power dissipation	I = 4 mm, T _L = 25 °C	P _{tot}	500	mW
Zener current		I _Z	P _{tot} /V _Z	mA

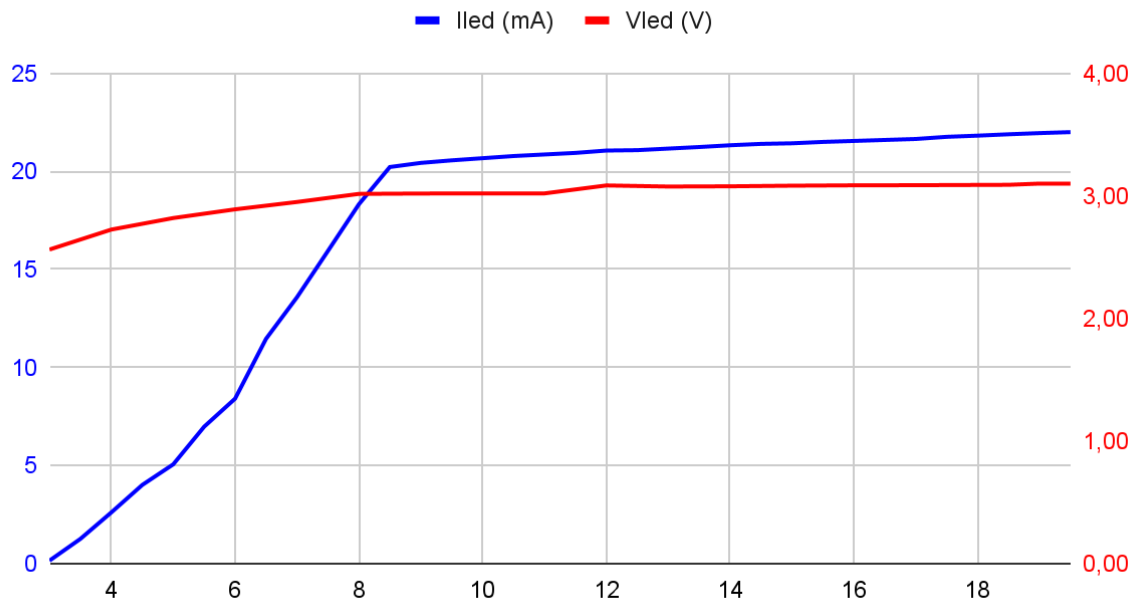
$$I_Z = P_{TOT} \div V_Z = 0,5 \div 5,1 \approx 100mA$$

$$R_E = (V_{CC} - V_Z) \div I_Z = (20 - 5,1)/0,1 \approx 1000\Omega$$

Hacer un barrido de tensiones y comprobar la corriente que circula por los LED, analizar su comportamiento y justificar si igual al resultado que esperábamos

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
3	2,56	0,15	11,5	3,05	20,94
3,5	2,64	1,26	12	3,09	21,06
4	2,73	2,61	12,5	3,08	21,08
4,5	2,77	4,01	13	3,08	21,16
5	2,82	5,06	13,5	3,08	21,24
5,5	2,85	6,98	14	3,08	21,33
6	2,89	8,41	14,5	3,08	21,4
6,5	2,92	11,46	15	3,08	21,43
7	2,95	13,58	15,5	3,08	21,5
7,5	2,98	15,94	16	3,09	21,55
8	3,02	18,32	16,5	3,09	21,6
8,5	3,02	20,22	17	3,09	21,65
9	3,02	20,43	17,5	3,09	21,76
9,5	3,02	20,56	18	3,09	21,82
10	3,02	20,67	18,5	3,09	21,89
10,5	3,02	20,78	19	3,10	21,95
11	3,02	20,86	19,5	3,10	22

Representar en el gráfico inferior los datos obtenidos y cumplimentados en la tabla.

Tensión y Corriente en función de V_{cc} *Figura 138. Comportamiento V-I LED diferentes valor alimentación*

6. SIMULACIONES

Realizar en Pspice las simulaciones de los circuitos anteriores, adjuntar capturas del esquemático y de las gráficas obtenidas.

6.1. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO CON TRANSISTORES

Simulación del circuito reproduciendo las mismas condiciones del laboratorio.

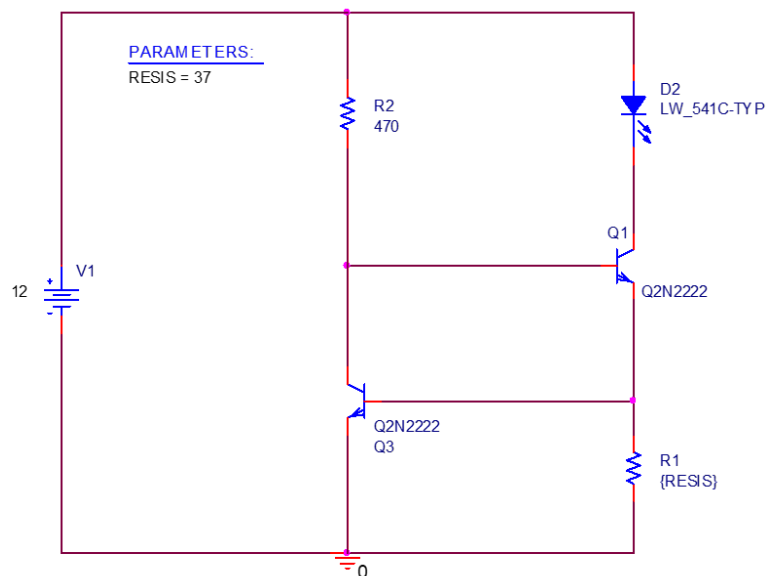


Figura 139. Circuito simulado en Pspice

En la siguiente gráfica se representa la corriente (azul) y la tensión (rojo) del LED durante un barrido de tensión de alimentación desde 0V hasta 20V, igual que se realizó en el laboratorio.

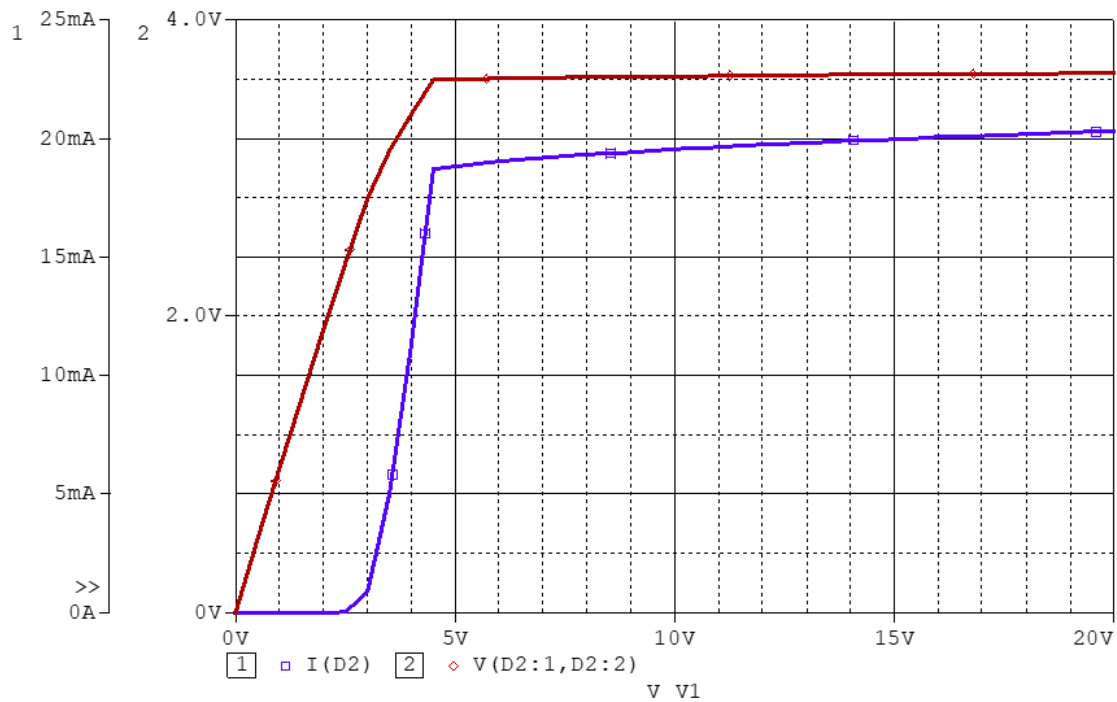


Figura 140. Comportamiento V-I LED simulado en Pspice

En ambas gráficas (laboratorio y simulación) se aprecia como la corriente del LED mantiene un crecimiento conforme la tensión del circuito se incrementa. Para una aplicación no industrial podría valer este circuito pero para una aplicación como la que estamos analizando, la automoción, no podemos permitir dicha variación.

- Simular un impulso durante 10ms de 30V sobre una alimentación constante de 15V.
- Incluir captura de la fuente y gráfica del análisis.
- Analizar resultados.

Análisis de una fluctuación en la fuente de alimentación, afectando así en un incremento en la corriente de colector del transistor dos. Como se definió en la descripción básica de la práctica, al aumentar la corriente de colector de Q2 (Q3 en la simulación), aumenta también la corriente de colector en Q1, el efecto se encuentra en la corriente de base del Q1 que se reduce, al contrario que en el transistor Q3 con el objetivo de derivar la mayor corriente posible por el transistor Q3 y mantener constante la tensión V_{be} que es dependiente de la corriente de colector.

$$I_c = I_s(e^{eV_{be}/V_t} - 1)$$

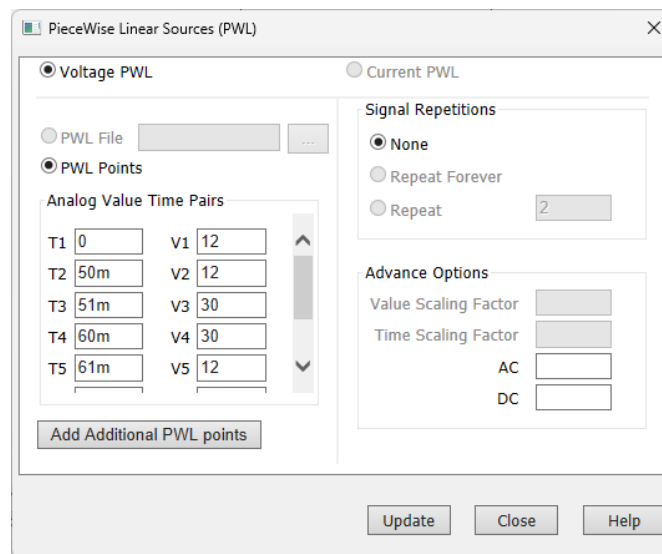


Figura 141. Condiciones fuentes de alimentación variable

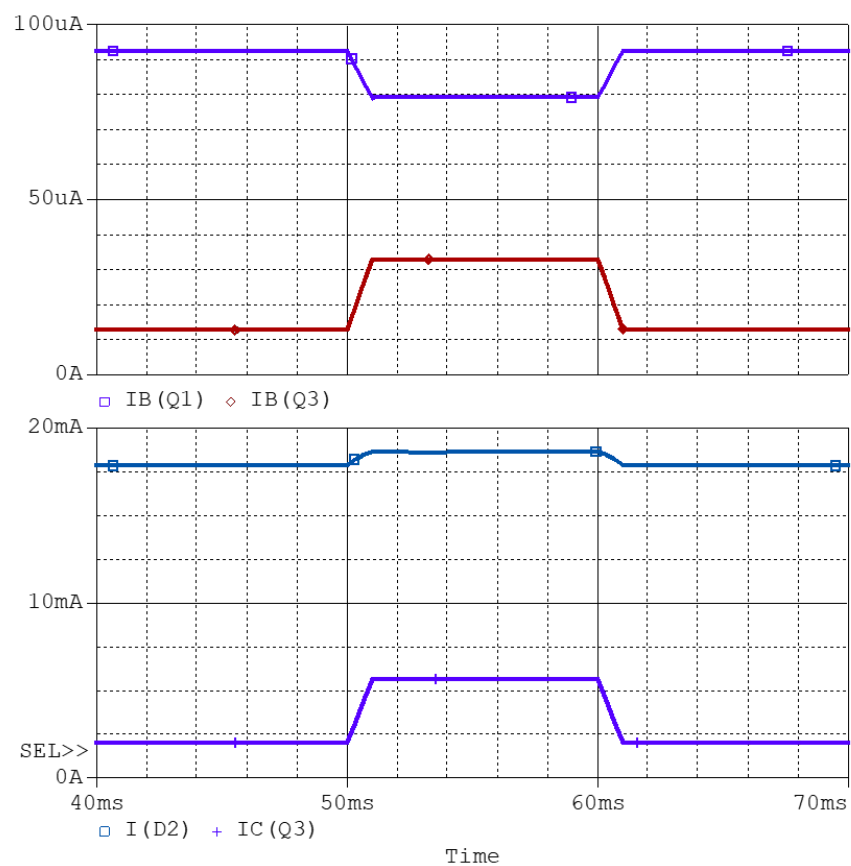


Figura 142. Comportamiento corriente diodo, base y colector con ante un pulso variable en pspice

6.2. MODULACIÓN PWM

El siguiente circuito respeta la topología del apartado 5.1 y a su vez copia el montaje propuesto por el circuito integrado AL5802 en su hoja de características. Dicho circuito tiene la capacidad de controlar la corriente que circula por el LED sólo agregando una fuente generadora de señales y un transistor mosfet. Éste proceso es conocido como Dimming.

El sentido de usar un transistor mosfet es la sencillez, al ser excitable por tensión, éste no requiere más componentes que la fuente conectada a su puerta (G).

El mosfet, al ser excitado deriva la corriente que demanda Q3 hacia sí mismo, evitando la excitación del transistor y por consiguiente la circulación de corriente por el LED. Si el tiempo de excitación del mosfet es controlado por una señal pulsante, se consigue una reducción de la corriente que circula por el LED y para evitar un parpadeo visible de éste, se puede proporcionar una frecuencia mayor en la fuente pulsante.

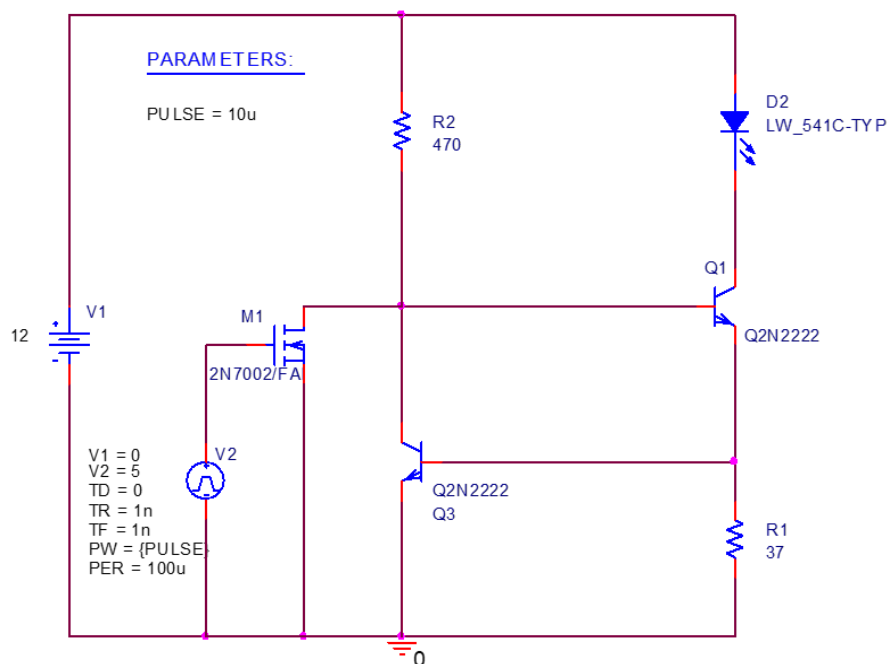


Figura 143. Circuito con transistores polarizados y señal PWM en Pspice

La gráfica representa durante 100µs la corriente a través del LED con un barrido paramétrico del ancho de pulso de la fuente de señal cada 12.5%.

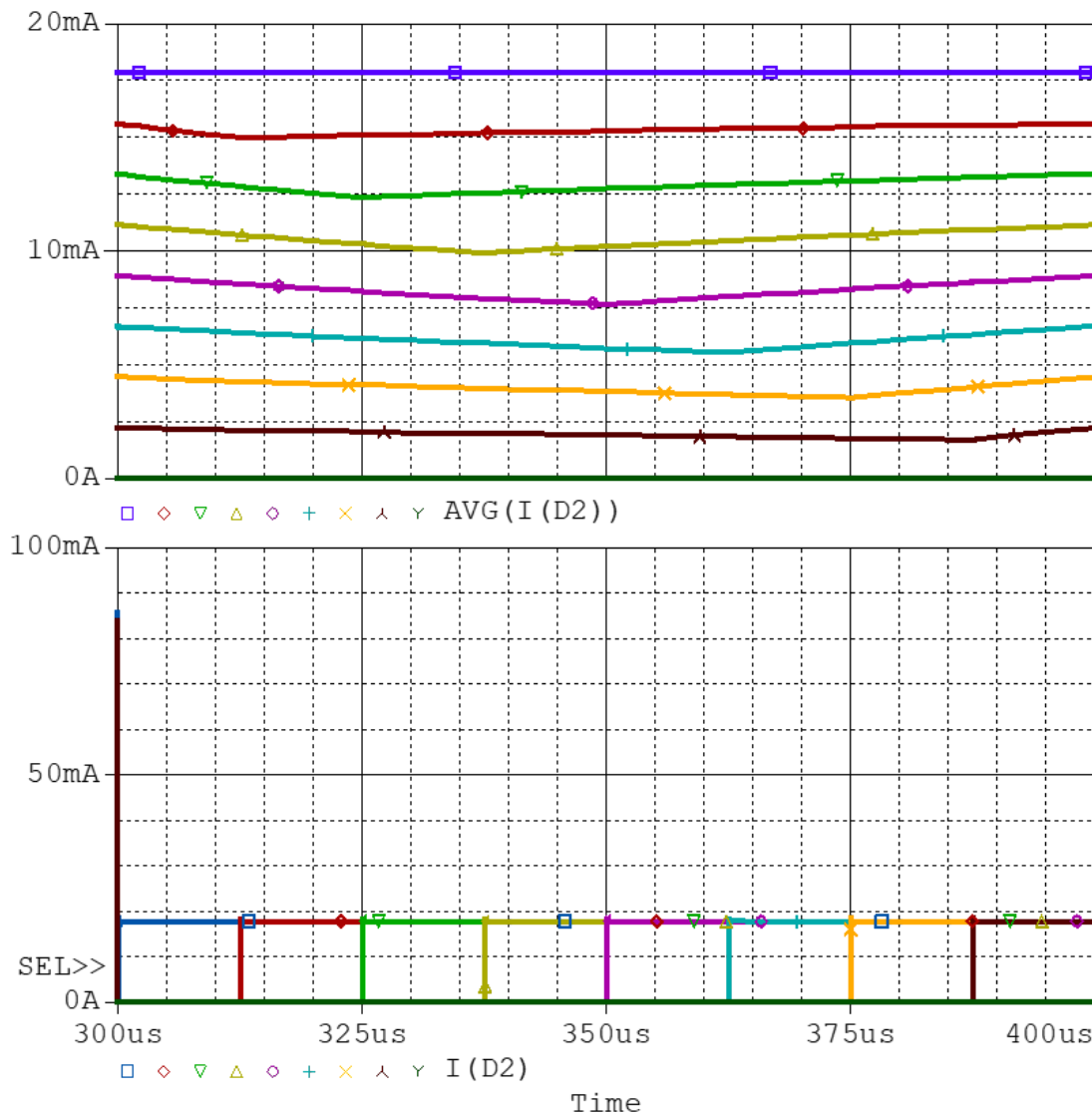


Figura 144. Respuesta corriente media y forma de onda en el LED para un barrido de PWM en Pspice

Se representan pico de corriente los cuales hay que tener en cuenta, pudiera darse el caso que el LED no permita esa corriente de pico. Cada color representa un ancho de pulso, desde 0 hasta 100% con un incremento del 12.5% y en la siguiente gráfica se realiza un cálculo de la media de corriente que circula por el LED. El primer color (azul) con un 0% de ancho de pulso representa la corriente que circula con su topología normal y según simulado apartados atrás. Con un 50% y con su gráfica en rosa, dicha corriente alrededor de los 10mA presenta un pequeño rizado de señal que conforme pase el tiempo será más estable. Al 100% de ancho de pulso gráfica color verde la corriente es constante en 0A.

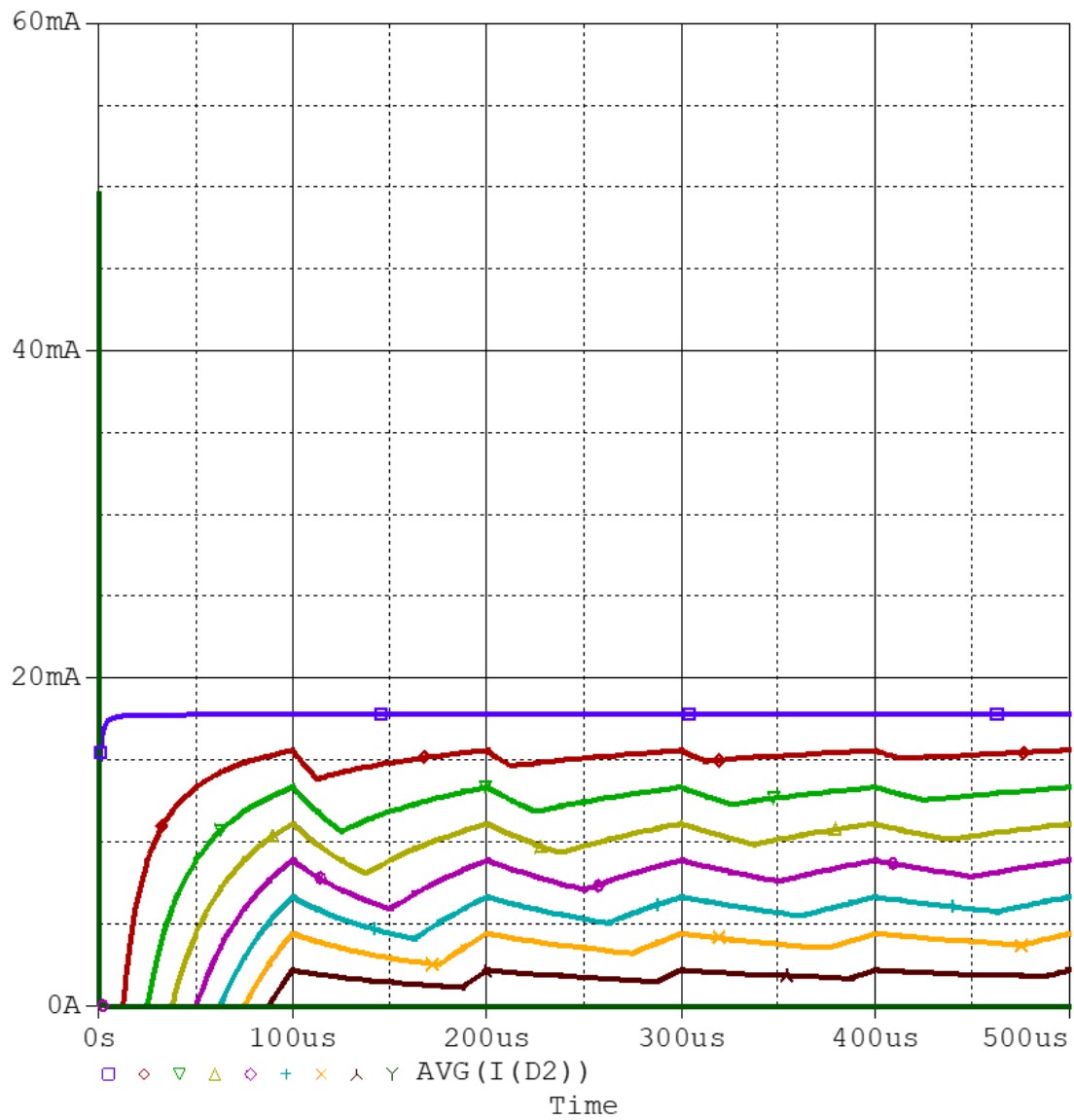


Figura 145 Corriente media en el diodo ante barrido PWM en Pspice

6.3. SIMULACIÓN CIRCUITO CON DIODO ZENER

Simulación del circuito reproduciendo las mismas condiciones del laboratorio.

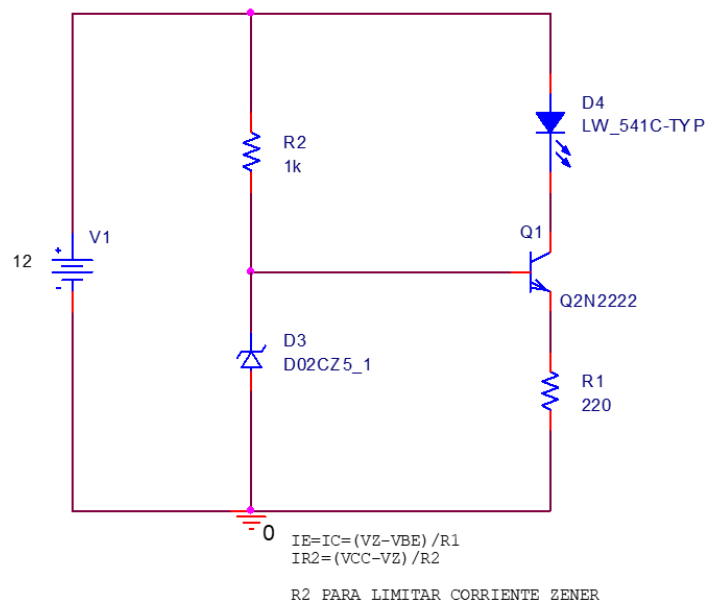


Figura 146. Circuito Transistor polarizado con D. Zener

En la gráfica se representa corriente (azul) y tensión (rojo) del LED en un barrido de tensión de la tensión de alimentación desde 0V hasta 20V

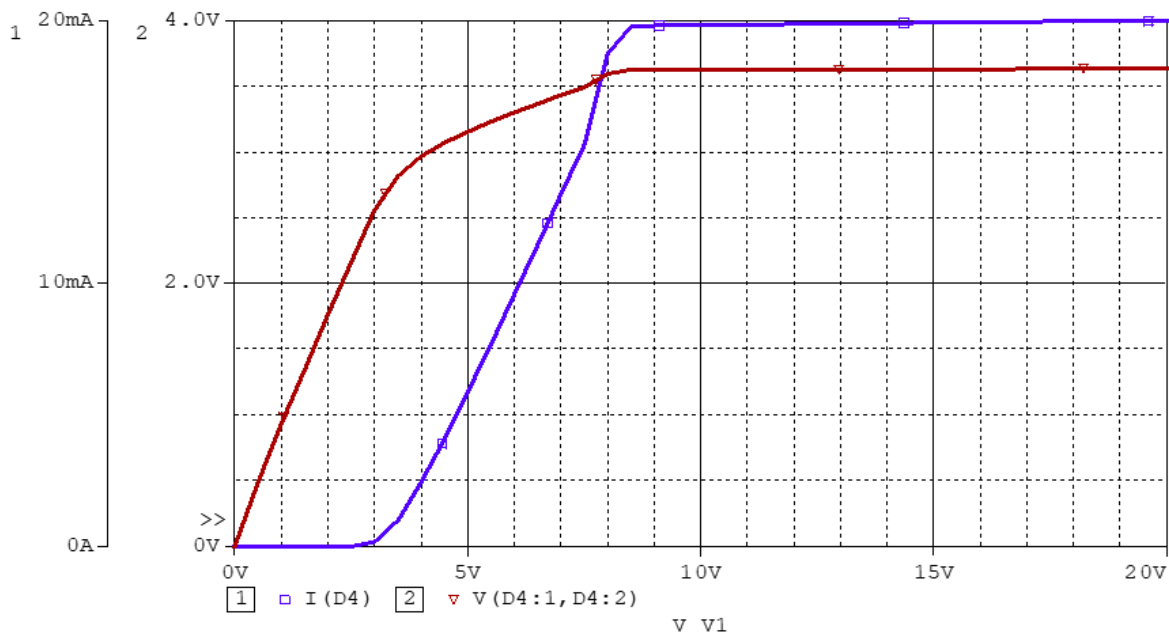


Figura 147. Comportamiento V-I LED a diferentes tensiones de alimentación simulado con Pspice.

Ambos LED son blancos, para realizar una simulación más parecida a la realidad, se debería de parametrizar un LED en PSPICE con su curva V-I obtenida del laboratorio. Como con las versiones Lite de PSPICE ésto no se puede hacer, la simulación se realiza con un LED OSRAM de 5mm.

Los resultados salen más estables que en el laboratorio, ya detecté en el laboratorio la necesidad de dejar el LED encendido aproximadamente 5 minutos para estabilizar el LED en temperatura y dar unas medidas constantes, no como los resultados del último apartado, además de la tolerancia del multímetro.

Dicho circuito presenta un comportamiento bastante más estable que el anterior, este sí podría cumplir requisitos para ser utilizado en automoción.

Con ésta gráfica solo quiero demostrar que despreciar en los cálculos el valor de la corriente de base tiene su sentido, el valor de ésta es de $110\mu\text{A}$.

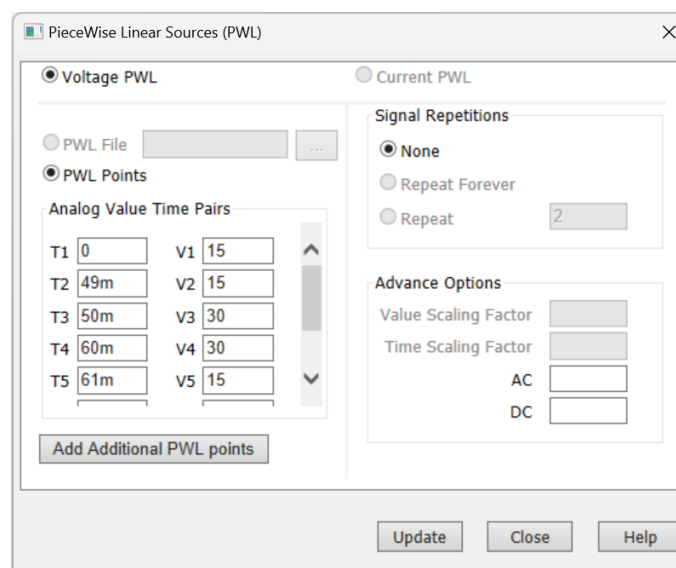
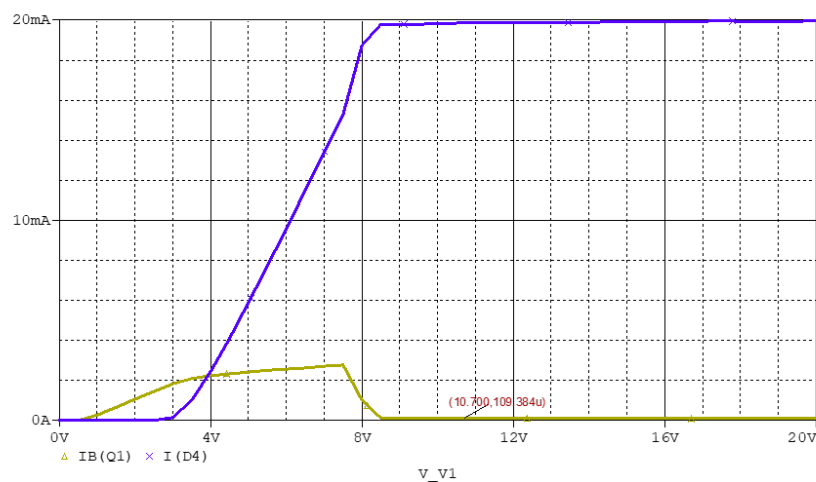


Figura 148. Configuración fuente de alimentación variable en Pspice

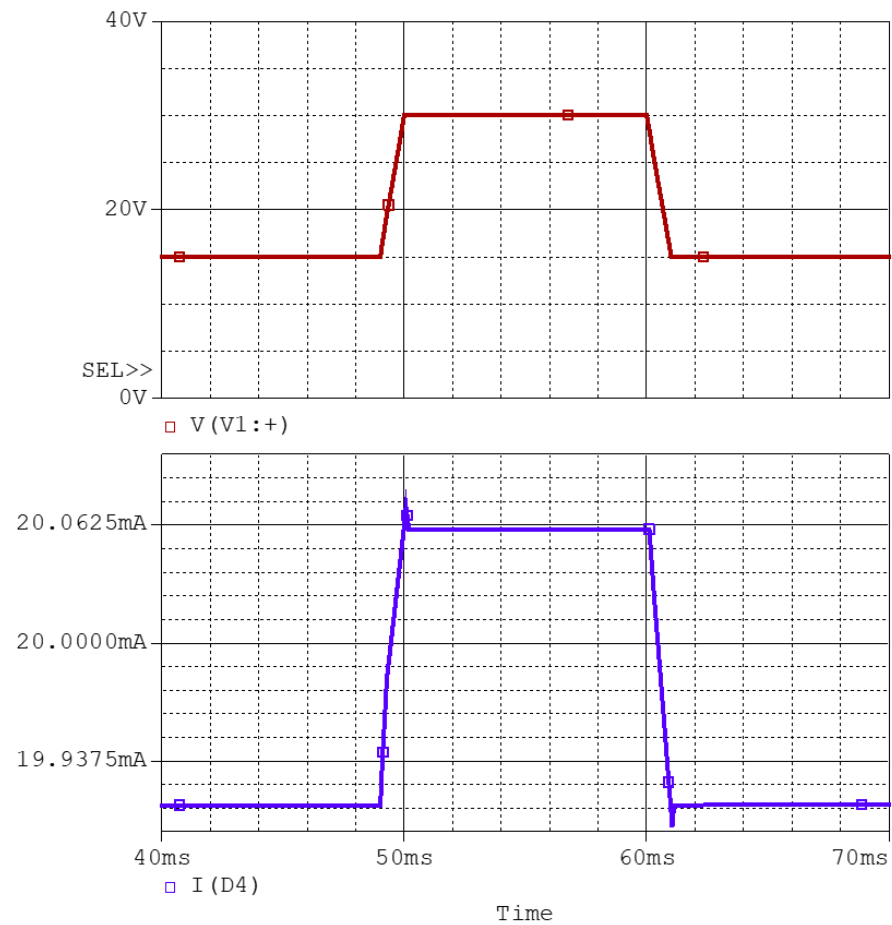


Figura 149. Variación de corriente con un pulso al doble de la tensión de alimentación simulado en Pspice

7. CONCLUSIONES

Si se hiciera la pregunta ¿Por qué los dos circuitos no llegan a comportarse igual si la diferencia es cambiar un transistor por un diodo zener?. LA respuesta es que son circuitos con un modo de funcionamiento totalmente diferente, uno mantiene constante la tensión Base-Emisor con mediante la tensión del diodo Zener y el otro genera una realimentación negativa haciendo que la corriente de colector permanezca constante.

En la captura de la siguiente gráfica, extraída de la [datasheet](#) del transistor Q2N2222, está analizado el comportamiento de la tensión Colector-Emisor (V_{CE}) con respecto a su corriente de Colector (I_C), en ella se aprecia como un incremento de la corriente supone dejar de considerar V_{BE} como un valor fijo de 0,7V en saturación que es como han sido realizados los cálculos previos.

Con el datasheet y la gráfica extraída de la simulación, se observa como el transistor tiene un comportamiento no constante, sino que varía según I_C .

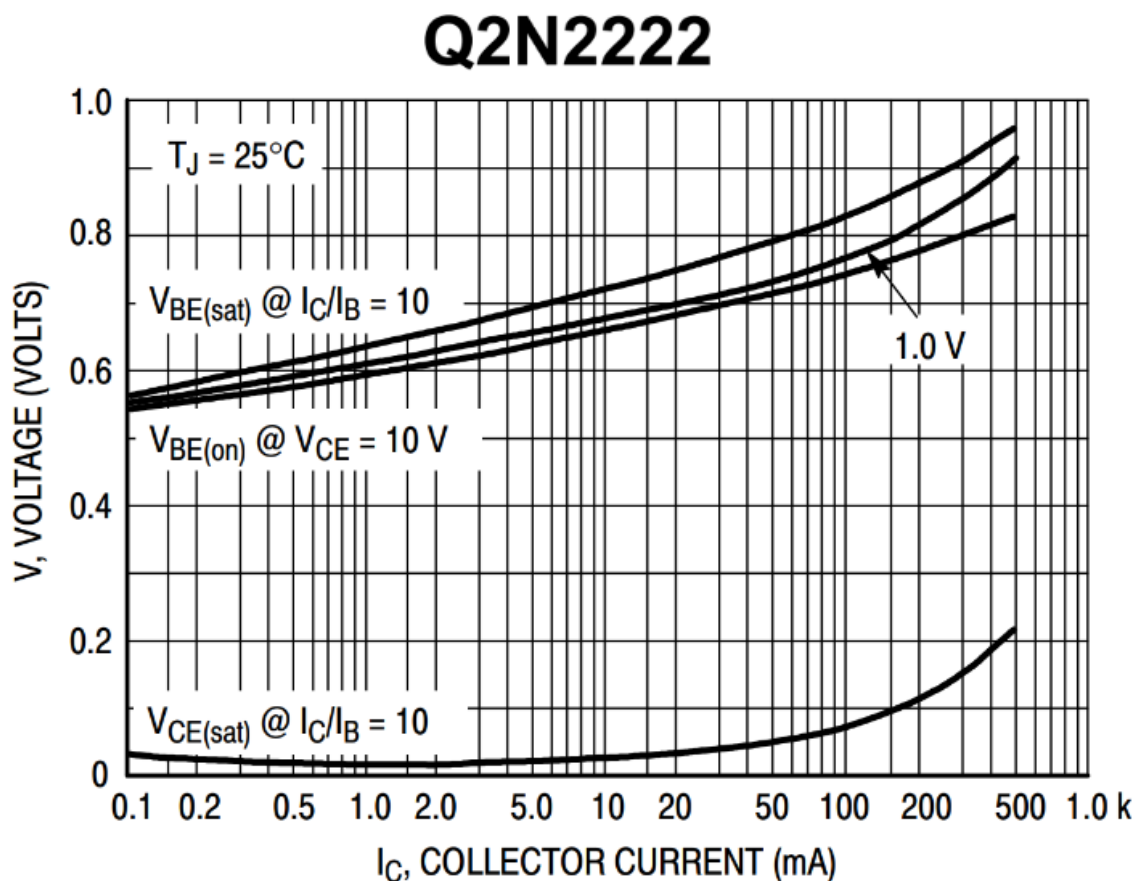


Figure 11. “On” Voltages

Figura 150. Curva corriente de colector frente tensión en el transistor [50]

Esta gráfica contiene en rojo V_{BE} , en azul I_C del transistor 3 del circuito 1 y en verde I_{LED} .

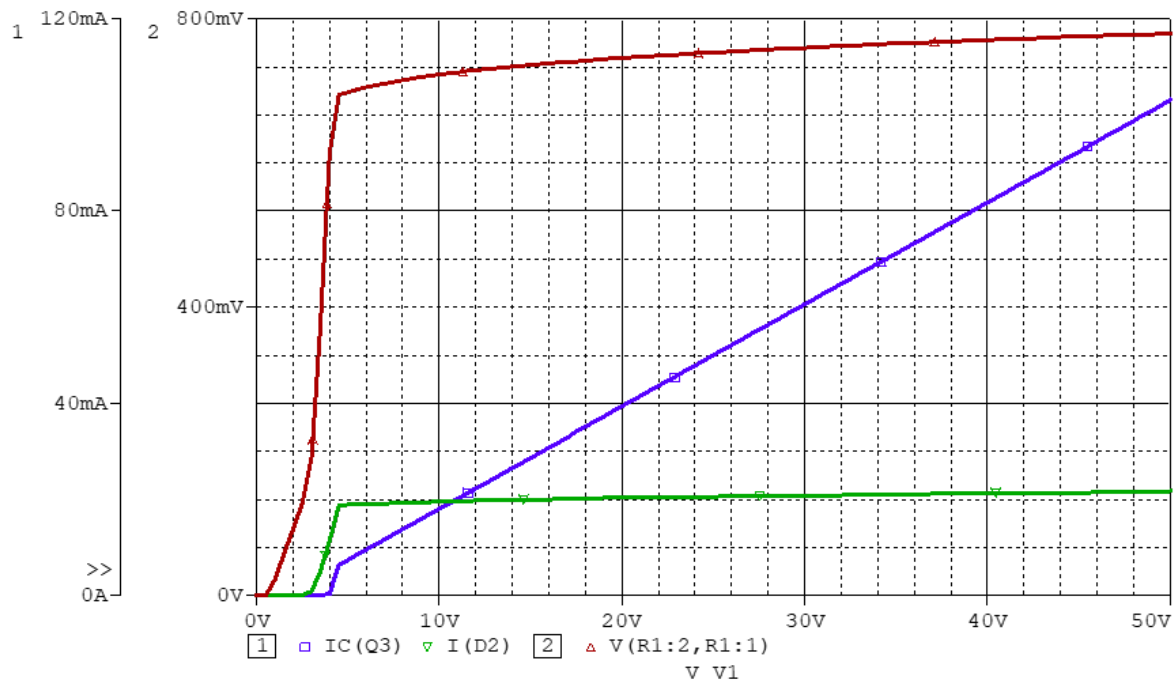


Figura 151. Corriente colector, corriente en el diodo y tensión base-emisor del transistor simulado.

Este análisis resulta del primer circuito y la respuesta a la pregunta que se formula al inicio del apartado se obtiene de interpretar los datos anteriores.

Si en el primer circuito la corriente del led se calcula como la diferencia entre la tensión de base - emisor entre la resistencia de LED y la tensión base - emisor que hemos considerado como un valor fijo, vemos en la gráfica que ese no es su comportamiento, con esto se deduce ese incremento de corriente en el LED.

Sin embargo como la tensión del diodo zener en el apartado 2 es constante, dicha corriente si tendrá un comportamiento constante.

Práctica 2. FUENTE LINEALES DE CORRIENTE

1. INTRODUCCIÓN

Como hemos aprendido en la práctica 1, los LED son controlados por corriente y no por tensión. Por ello en ésta práctica vamos a profundizar en el conocimiento de la fuente de corriente, analizando varios circuitos a través de cálculos que comprobaremos si son correctos con una simulación en el software ORCAD PSPICE y montándose en laboratorio, usaremos los LED de la práctica 1 puesto que ya conocemos su curva V-I.

2. OBJETO DE LA PRÁCTICA

Aprender el funcionamiento de las fuentes de corriente constante analizando por un lado el circuito teóricamente, otra parte experimental en el laboratorio y para terminar una simulación con software.

3. DESCRIPCIÓN BÁSICA

La práctica consta de 2 circuitos diferenciados por su topología y consecuentemente varían sus cálculos.

El primero de ellos está formado por dos transistores, la corriente que circulará por el LED la determinará la resistencia R_{LED} , demostrar por qué la corriente sólo depende de ese valor de resistencia.

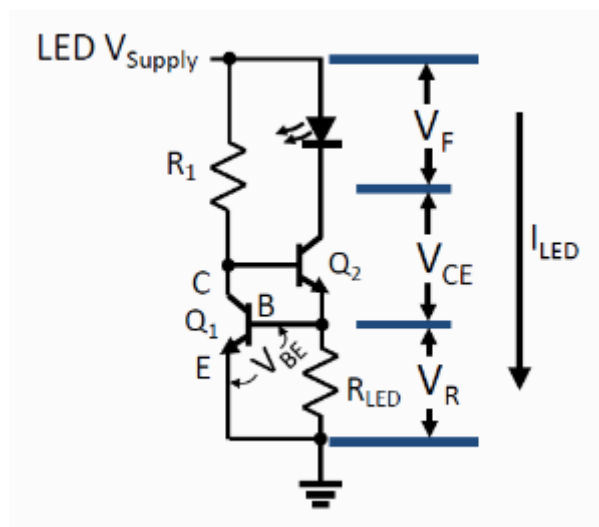


Figura 152. Transistores polarizados .

El segundo circuito continúa con la simplicidad de éstos, está formado por un transistor y un diodo zener. La corriente que circula por los LEDs también vendrá determinada por la resistencia que se encuentra en el emisor del transistor. Nuevamente demostrar el cálculo necesario para hallar su valor conforme a la corriente que queremos circule por los LEDs

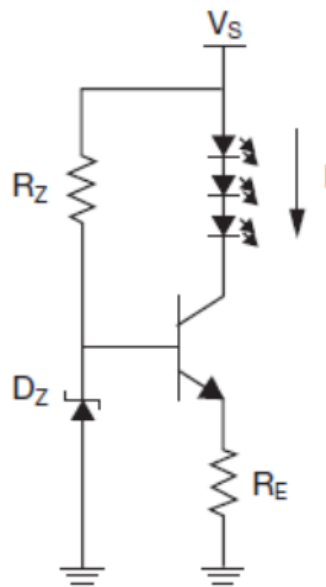


Figura 153. Transistor polarizado con diodo

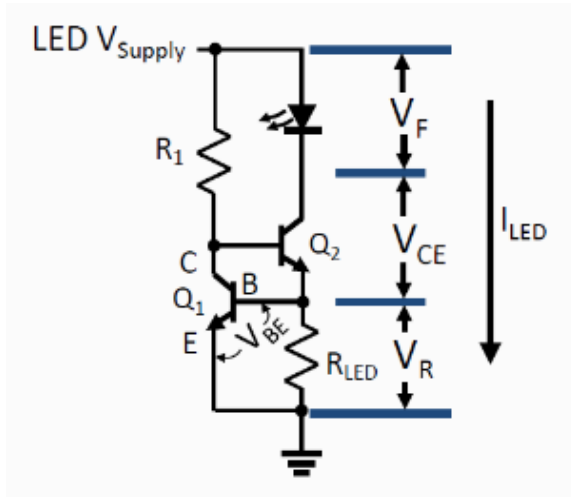
Para ambos circuitos calcular o dar valor a las resistencias adicionales haciendo su demostración ecuacional.

4. LISTADO DE MATERIAL

- ☐ Fuente de alimentación DC
- ☐ Generador de funciones
- ☐ Multímetro con sondas
- ☐ LEDs de los colores que tengamos disponibles en el laboratorio, al menos azul, rojo y blanco.
- ☐ Transistores BC547 (NPN)
- ☐ Diodos ZENER 3_3 o 5_1
- ☐ Armario de resistencias para elegir conforme a los cálculos a desarrollar.

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Realizar el montaje del primer circuito:



Introducir fotografía del circuito montado:

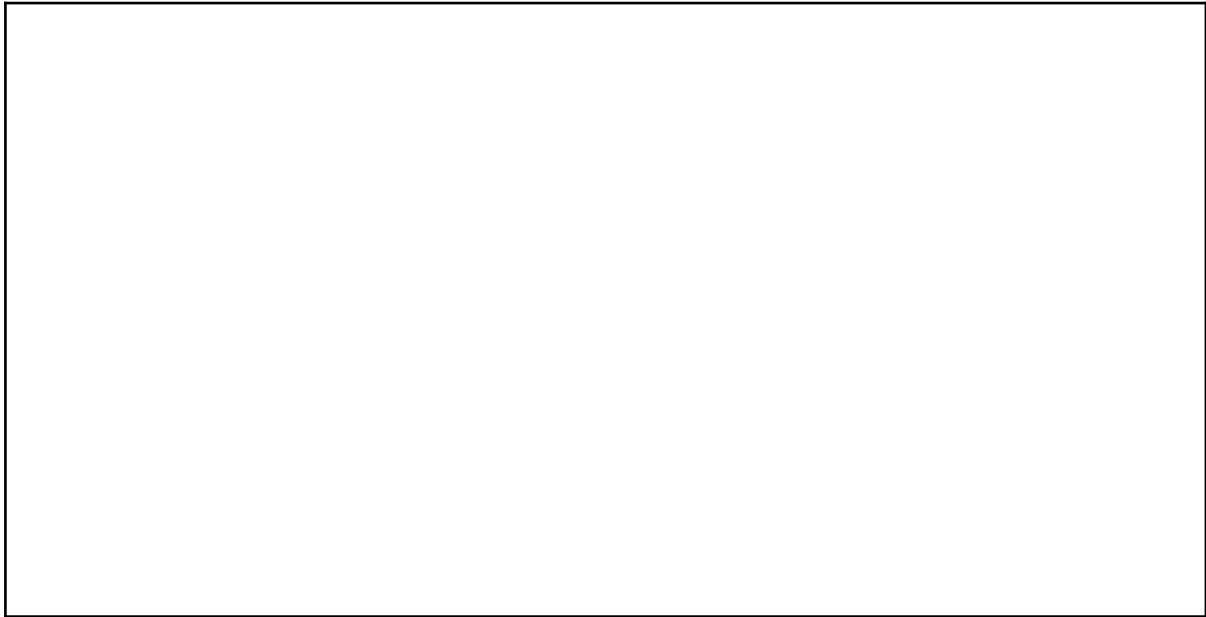
Una vez realizados los cálculos de las resistencias (Introducir demostración en el siguiente recuadro para el primer circuito)



Hacer un barrido de tensiones y comprobar la corriente que circula por los LED, analizar su comportamiento y justificar si igual al resultado que esperábamos

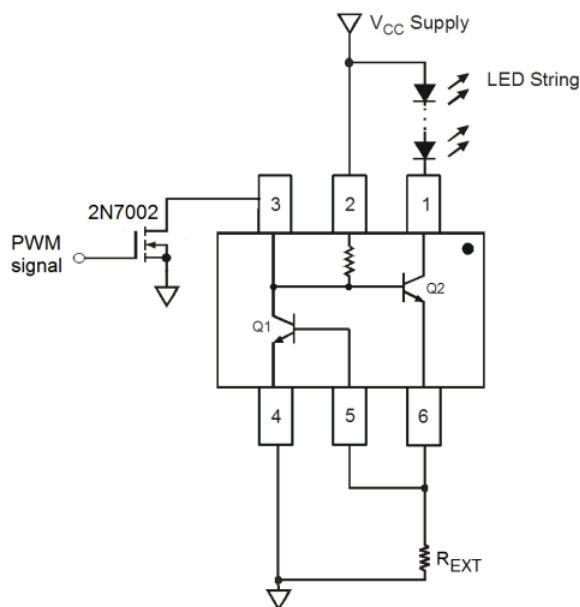
Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
0			8		
0,5			8,5		
1			9		
1,5			9,5		
2			10		
2,5			10,5		
3			11		
3,5			11,5		
4			12		
4,5			12,5		
5			13		
5,5			13,5		
6			14		
6,5			14,5		
7			15		
7,5			15,5		

Representar en el gráfico inferior los datos obtenidos y cumplimentados en la tabla.



Antes de desmontar el circuito vamos a probar el concepto del DIMMING, ¿qué sucedería si agregamos una señal PWM en la base de Q2 / colector de Q1?. Realizar el montaje y comprobar variando el ancho de pulso de la señal lo que sucede en el LED.

Introducir imagen del circuito montado:



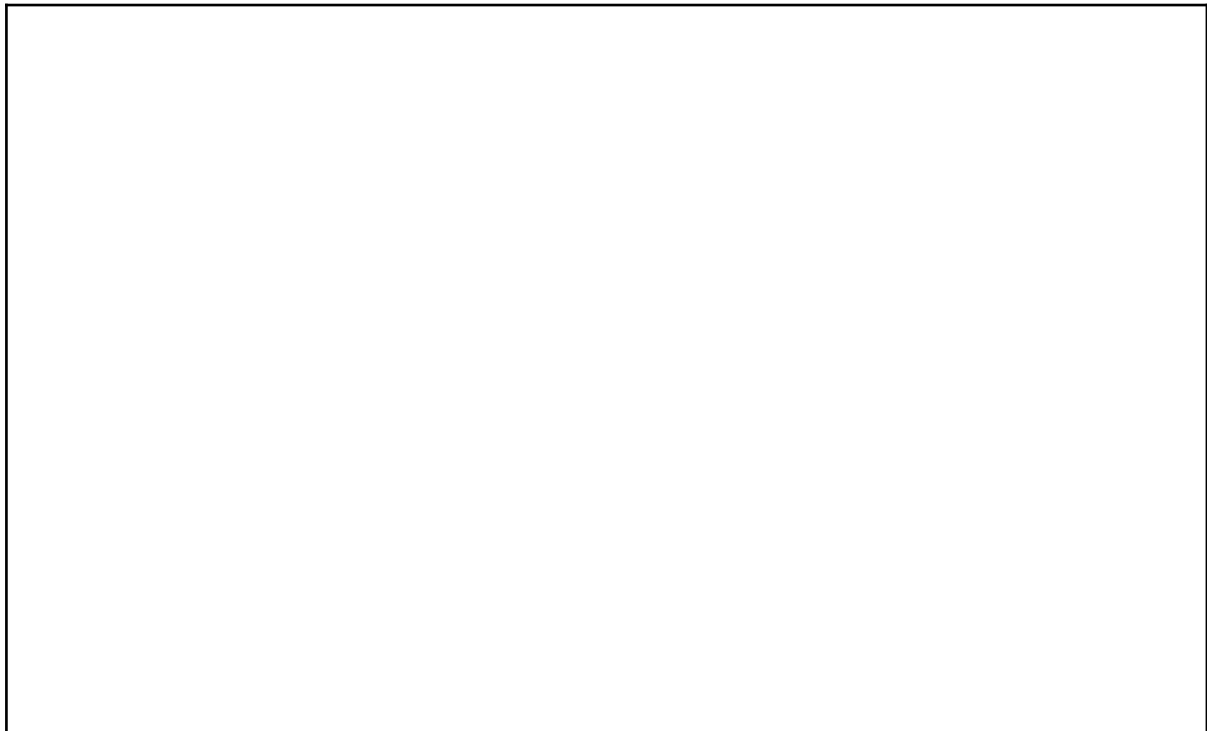
Como se aprecia en la imagen tipo, necesitaremos un transistor adicional a los ya usados en el montaje, en éste caso usaremos uno de tipo MOSFET, el cuál nos permite excitar por tensión. Además vamos a usar el generador de señales para una señal pulsante $V_{m\acute{a}x}$ 5V y $V_{m\acute{i}n}$ 0V y una frecuencia aproximada de 1kHz.

Analizar el comportamiento del circuito, ¿A mayor PWM mayor corriente por el led o a mayor PWM menos corriente por el LED?, demostrar su funcionamiento.

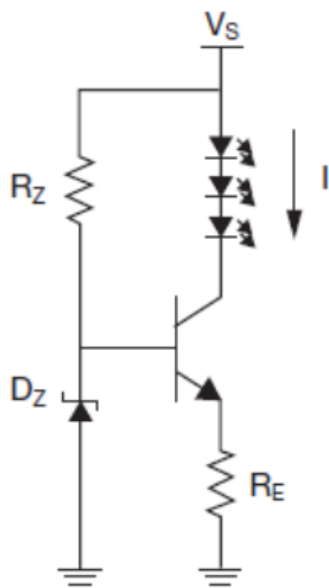
El generador de funciones sólo nos permite variar el PWM entre 20% y 80% así que tomaremos la corriente que circula por los LED con los diferentes valores.

Tensión aliment. (V)	PWM (%)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
12	0		
12	20		
12	30		
12	40		
12	50		
12	60		
12	70		
12	80		
12	100		

Representar en una gráfica los datos obtenidos y reflejados en la tabla anterior

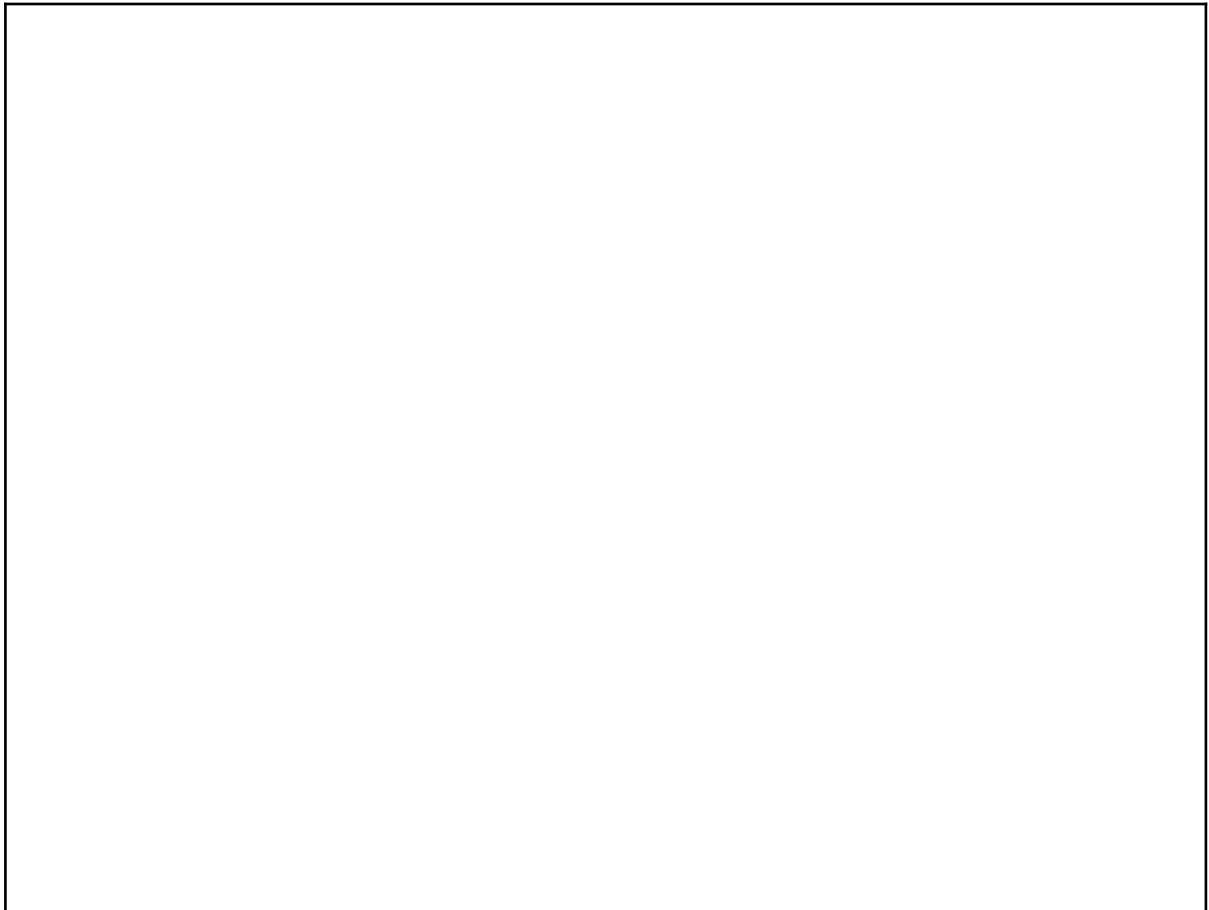


Realizar el montaje del siguiente circuito:



Introducir fotografía del circuito montado:

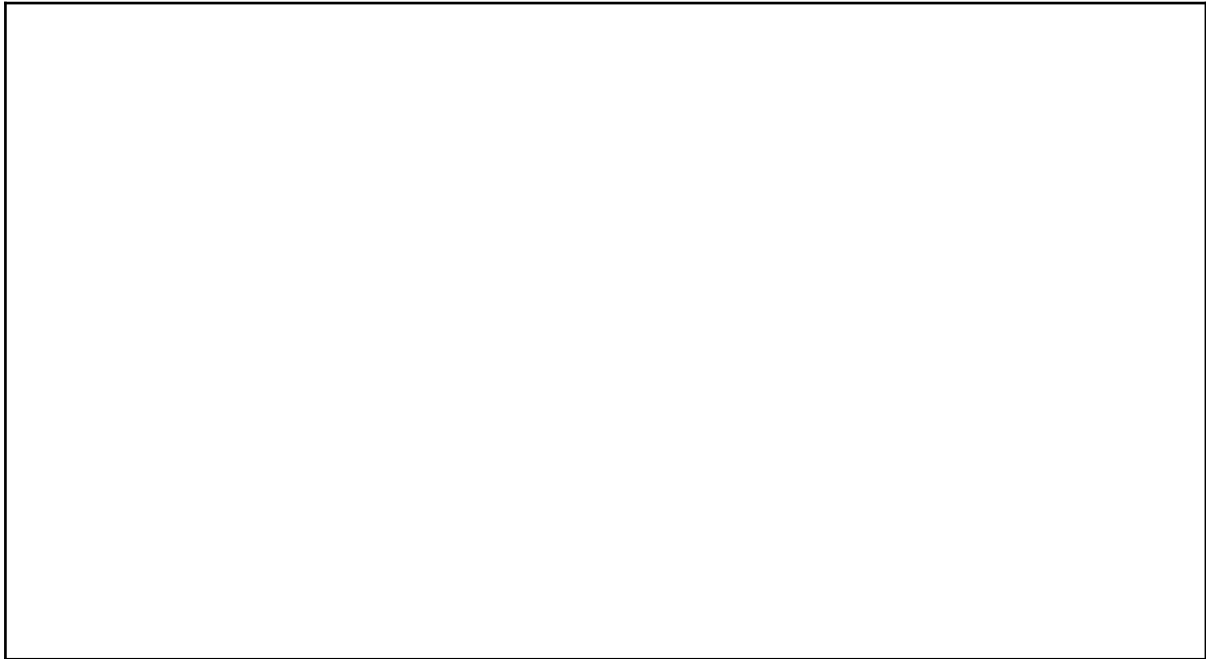
Una vez realizados los cálculos de las resistencias (Introducir demostración en el siguiente recuadro para el primer circuito)



Hacer un barrido de tensiones y comprobar la corriente que circula por los LED, analizar su comportamiento y justificar si igual al resultado que esperábamos

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
0			10		
0,5			10,5		
1			11		
1,5			11,5		
2			12		
2,5			12,5		
3			13		
3,5			13,5		
4			14		
4,5			14,5		
5			15		
5,5			15,5		
6			16		
6,5			16,5		
7			17		
7,5			17,5		
8			18		
8,5			18,5		
9			19		
9,5			19,5		

Representar en el gráfico inferior los datos obtenidos y cumplimentados en la tabla.



6. SIMULACIONES

Realizar en Pspice las simulaciones de los circuitos anteriores, adjuntar capturas del esquemático y de las gráficas obtenidas.

7. CONCLUSIONES

Práctica 3. DRIVER REGULADORES PROFESOR

1. INTRODUCCIÓN

En esta práctica se estudia el funcionamiento de algunos de los diferentes circuitos integrados que hay en el mercado como reguladores lineales y según la topología del circuito que le acompañe puede funcionar como reguladores de tensión o de corriente.

2. OBJETO DE LA PRÁCTICA

Aprender los diferentes circuitos que nos proporcionan los fabricantes con los datasheet de los componentes y el comportamiento que conlleva cada topología.

3. DESCRIPCIÓN BÁSICA

Se van a estudiar siete diferentes funcionamientos con tres drivers distintos. CL2N3, LM317 y L78XX

4. LISTADO DE MATERIAL

- ☐ Fuente de alimentación DC 30V 3A
- ☐ Multímetro precisión igual o mayor al 0,1%
- ☐ LED azul, rojo y blanco de 20mA.
- ☐ C.I. CL2N3
- ☐ C.I. LM317
- ☐ C.I. L78XX
- ☐ Resistencias serie E12.

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

El desarrollo de la presente práctica se basa en el montaje de diferentes tipos de circuitos con diferentes circuitos integrados.

5.1. C2LN3

Este C.I. presenta diferentes encapsulados, pero para el laboratorio el que más se adapta es TO-92, por su capacidad de pincharse en la placa de experimentación.

DATASHEET

Package Type

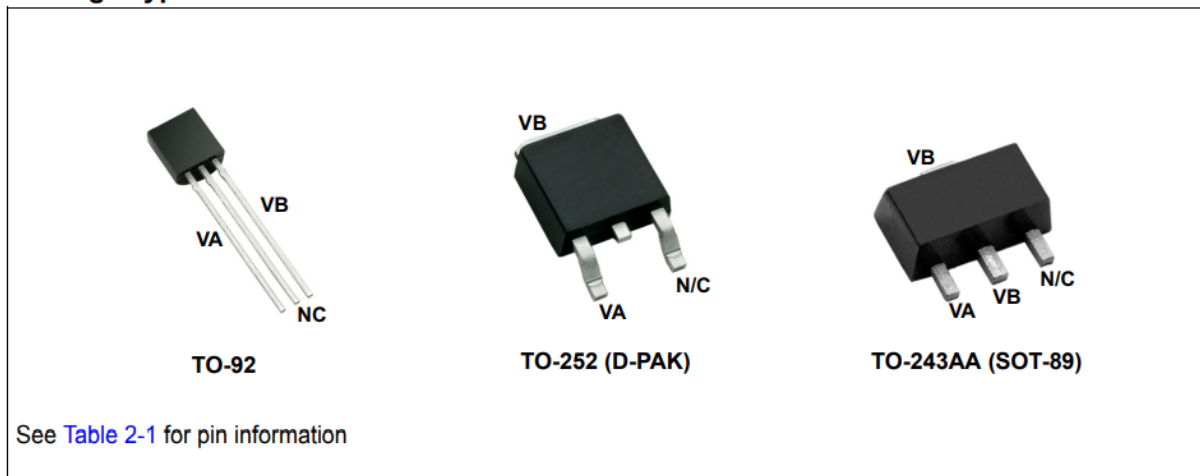


Figura 154 Encapsulados CL2N3 [51].

Siguiendo con sus características, su rango de alimentación oscila entre los 5V y los 90V, en dicho rango tiene una salida constante de $20\text{mA} \pm 10\%$.

Estas características son las que hay que comprobar en nuestro ensayo, variar la tensión de alimentación y comprobar que la corriente que circula por el LED es la misma.

Typical Application Circuit

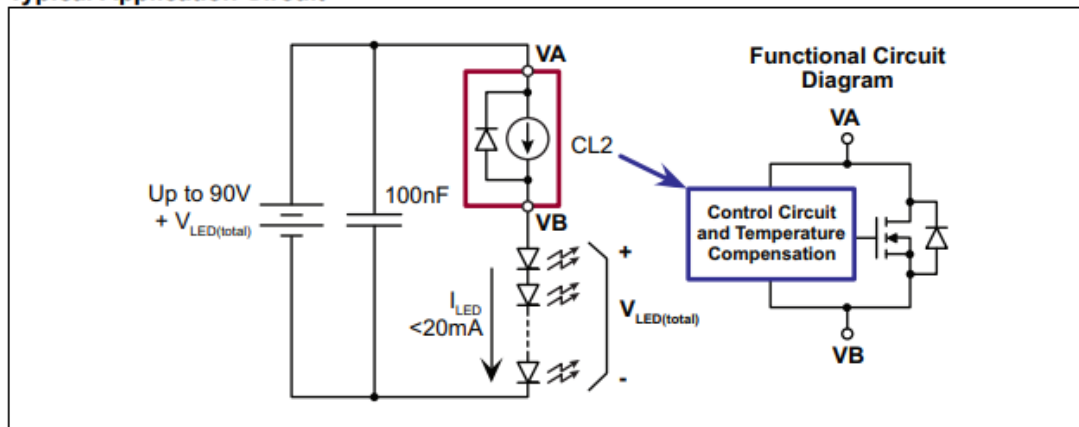


Figura 155. Estructura propuesta para CL2N3 [51]

Realizar el montaje en el laboratorio del circuito anterior con 4 LEDs blancos y analizar su comportamiento desde 0V hasta 20V, comprobar que el dispositivo funciona como se refleja en su hoja de características.

Para ello medir la curva V-I del diodo LED:

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
1	0,367	0	11	9,46	0
2	1,240	0	12	10,22	0,16
3	2,057	0	13	10,67	1,40
4	2,927	0	14	11,28	4,92
5	3,768	0	15	11,87	9,35
6	4,71	0	16	12,51	16,09
7	5,68	0	17	12,68	19,37
8	6,70	0	18	12,70	19,91
9	7,75	0	19	12,73	20,12
10	8,72	0	20	12,70	20,2

V-I CL2N3 CON 4 LEDs

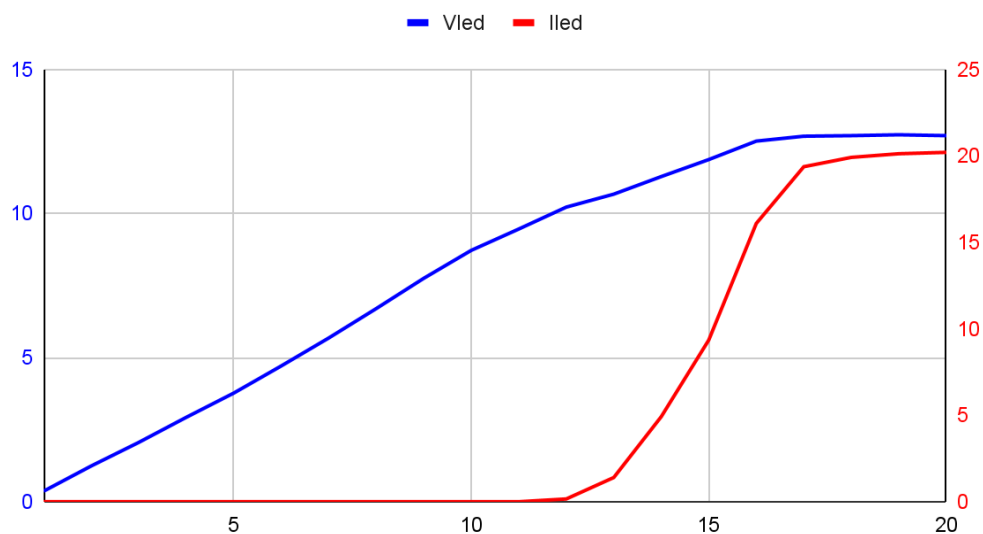


Figura 156. V-I LED a diferentes tensiones de alimentación

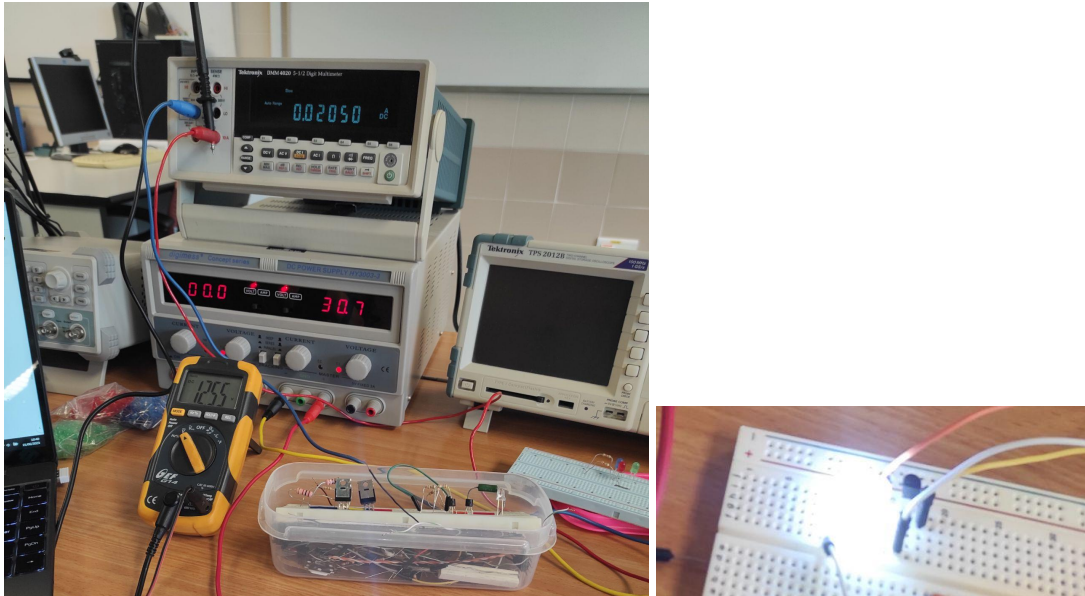
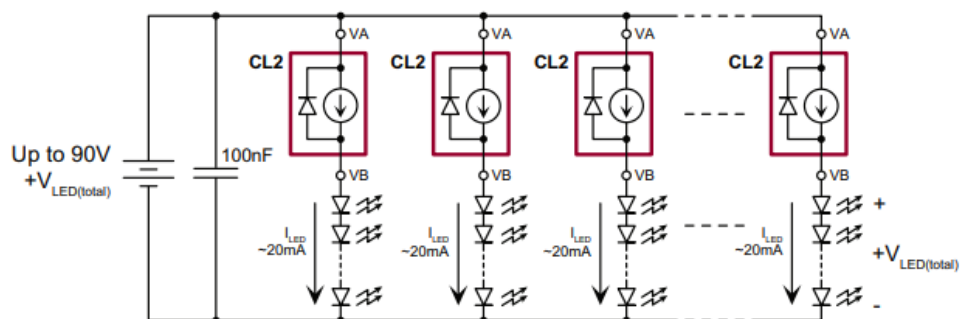


Figura 157. Montaje CL2N3 con 4 LEDs a 30V de alimentación

Para comprobar si la lectura de la hoja de característica ha sido comprensiva, realizar el montaje de 9 led, pueden ser de diferentes colores, y realizar éste con el menor número de componentes posibles y sin superar los 14v de alimentación. Por todos ellos debe circular 20mA.



Insertar foto del circuito diseñado:

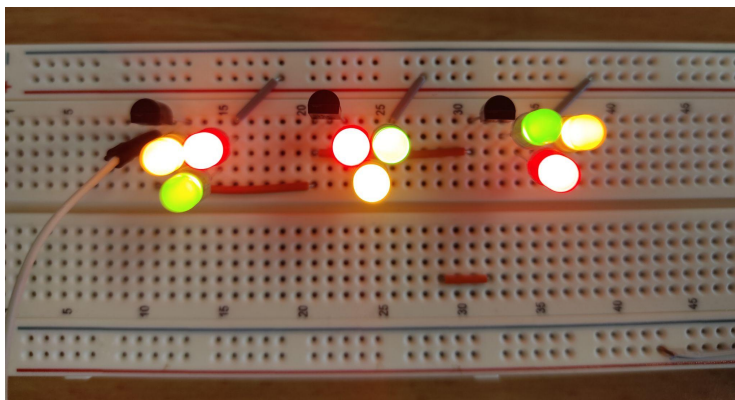


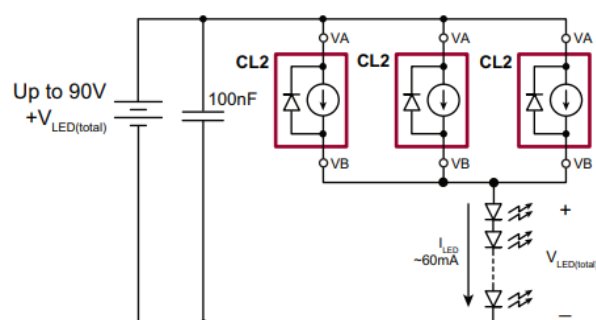
Figura 158. Montaje 3 CL2N3 en paralelo con 3 LEDs a 14V de alimentación

¿Qué tensión circula por cada rama? ¿Qué tensión cae en los LED de cada rama? ¿Cuántos LED hay en cada rama?

Si hay capacidad en el laboratorio, usar varios multímetros para agilizar las medidas.

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA RAMA 1 (V)	IF MEDIDA RAMA 1 (mA)	VLED MEDIDA RAMA 2 (V)	IF MEDIDA RAMA 2 (mA)	VLED MEDIDA RAMA 3 (V)	IF MEDIDA RAMA 3 (mA)
1	0,234	0	,238	0	0,268	0
3	1,72		1,711	0	1,716	0
5	3,663	0	3,651	0	3,656	0
7	5,17	0	5,18	0	5,18	0
8	5,68	1,95	5,66	1,57	5,67	1,61
9	6,04	9,87	5,97	6,95	6,10	5,70
11	6,90	18,82	6,30	18,06	6,57	16,56
13	6,94	20,03	6,30	19,72	6,66	20,60
14	6,70	20,16	6,30	19,88	6,65	20,84
30	6,67	20,44	6,29	20,12	6,50	21,10

Explica cómo realizarías el montaje para alimentar un diodo de potencia cuya corriente nominal es superior a 20mA.



CL2N3 para alta corriente

Figura 159. Circuito propuesto para un LED de mayor potencia.

5.2. LM317

Este C.I. presenta diferentes encapsulados, pero para el laboratorio el que más se adapta es TO-200, por su capacidad de introducirse en la placa de experimentación.

[DATASHEET](#)

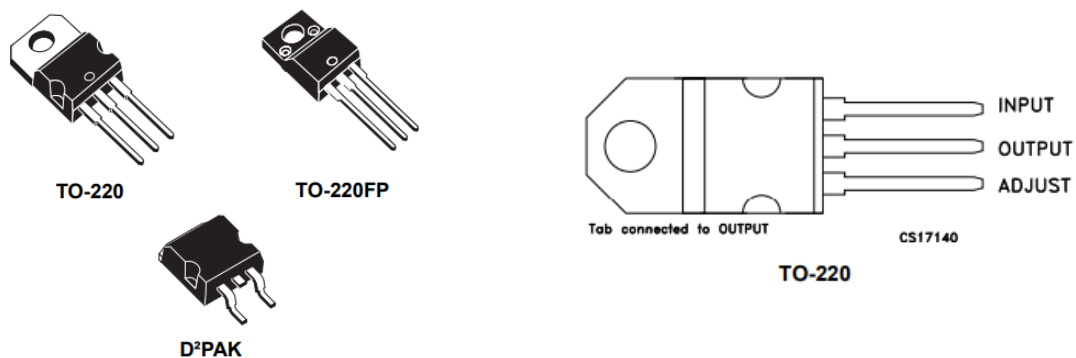


Figura 160. Encapsulados y pineado LM317 [52]

Ya conocido su pineado, hay que analizar sus características para profundizar en el comportamiento del driver y entender la manera de actuar en cada circuito que se plantea a continuación.

Máx. diferencial de voltaje, entrada - salida: 40V

Voltaje en el pin de referencia 1.25V

Corriente máxima de salida 2.2A

$V_I - V_O = 5\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $I_{MAX} = 1.5\text{ A}$ and $P_{MAX} = 20\text{ W}$, $T_J = 0\text{ to }125\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified.

Table 4. Electrical characteristics for LM317

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
ΔV_O	Line regulation	$V_I - V_O = 3\text{ to }40\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.01	0.04	%/V
				0.02	0.07	
ΔV_O	Load regulation	$V_O \leq 5\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		5	25	mV
		$V_O \geq 5\text{ V}$, $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		20	70	
I_{ADJ}	Adjustment pin current			0.1	0.5	%
				0.3	1.5	
I_{ADJ}	Adjustment pin current	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$		50	100	μA
ΔI_{ADJ}	Adjustment pin current			0.2	5	μA
V_{REF}	Reference voltage (between pin 3 and pin 1)	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $P_D \leq P_{MAX}$	1.2	1.25	1.3	V
$\Delta V_O/V_O$	Output voltage temperature stability			1		%
$I_{O(min)}$	Minimum load current	$V_I - V_O = 40\text{ V}$		3.5	10	mA
$I_{O(max)}$	Maximum load current	$V_I - V_O \leq 15\text{ V}$, $P_D < P_{MAX}$	1.5	2.2		A
		$V_I - V_O = 40\text{ V}$, $P_D < P_{MAX}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	0.4			
eN	Output noise voltage (percentage of V_O)	$B = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003		%
SVR	Supply voltage rejection ⁽¹⁾	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $f = 120\text{ Hz}$				dB
		$C_{ADJ} = 0$		65		
		$C_{ADJ} = 10\text{ }\mu\text{F}$	66	80		

1. C_{ADJ} is connected between adjust pin and ground.

Figura 161. Extracto datasheet [52]

5.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE

La primera topología que se plantea interesante de estudio en este proyecto es muy simple y hace trabajar al driver como un regulador de corriente.

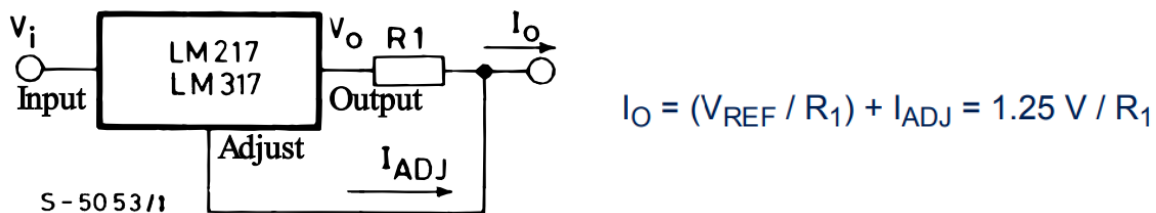


Figura 162 Extracto datasheet LM317 [52]

La fórmula para calcular la corriente de salida viene dada en la hoja de características. Para un montaje en el cuál se utiliza un [LED](#) de 350mA y 3,3V, calcular la resistencia necesaria.

¿Qué tipo de resistencia es necesaria para éste montaje en valor óhmico y de potencia?

$R_1 = \frac{V_{adj}}{I_{LED}}$ $P_{R_1} = V_{adj} \times I_{LED}$ $P_{D_{MAX}} = \frac{T_J - T_{Amb}}{R_{JC} + R_{CA}}$ $P_D = (V_{CC} - V_{ADJ} - V_{LED}) \times I_{LED}$	$V_{CC} = 12V$ $V_{LED} = 3,3V$ $V_{adj} = 1,25V$ $I_{LED} = 350mA$ $R_1 = 3,6\Omega$ $P_{R_1} = 0,44W$ $R_{JC} = 5^\circ C/W$ $R_{CA} = 50^\circ C/W$ $T_J = 125^\circ C$ $T_{Amb} = 25^\circ C$ $P_{D_{MAX}} = 1,82W$ $P_D = 2,60W$
--	---

Table 1. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter		Value	Unit
$V_I - V_O$	Input-reference differential voltage		40	V
I_O	Output current		Internally limited	A
T_{OP}	Operating junction temperature for:	LM217	- 25 to 150	°C
		LM317	0 to 125	
		LM317B	-40 to 125	
P_D	Power dissipation		Internally limited	
T_{STG}	Storage temperature		- 65 to 150	°C

Figura 163 Extracto datasheet LM317 [52].

Table 2. Thermal data

Symbol	Parameter	D*PAK	TO-220	TO-220FP	Unit
R_{thJA}	Thermal resistance junction-ambient	62.5	50	60	°C/W
R_{thJC}	Thermal resistance junction-case	3	5	5	°C/W

Figura 164 Extracto datasheet LM317 [52]

Antes de hacer ningún montaje, es necesario cerciorarse que los componentes utilizados están protegidos para no superar su condiciones máximas y que sufran daños, por eso, realizados los cálculos anteriores se sabe que hay que montar una resistencia de al menos 1/2W y un disipador para el componente.

Además, realizar el cálculo del disipador para que éste no supere los 50°C en el dispositivo, ¿Cuál sería el valor mínimo del disipador que aceptaría el dispositivo?

$$P_{D_{MAX}} = \frac{T_J - T_{Amb}}{R_{JC} + R_{CA} + R_D}$$

$$R_D = R_{JC} + R_{CA} - \frac{T_J - T_{Amb}}{P_{D_{MAX}}}$$

$$R_{JC} = 5^\circ C/W$$

$$R_{CA} = 50^\circ C/W$$

$$T_J = 50^\circ C$$

$$T_{J_{MAX}} = 125^\circ C$$

$$T_{Amb} = 25^\circ C$$

$$P_{D_{MAX}} = 1,82W$$

$$P_D = 2,60W$$

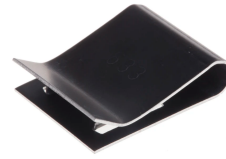
$$R_{D_{MIN}} = 16,5^\circ C/W$$

$$R_{D_{50^\circ C}} = 45,4^\circ C/W$$

Para cumplir el requisito mínimo existen disipadores del tipo pinza que se ponen sobre el componente, ambas partes metálicas en contacto para transmitir la temperatura. Ejemplos de ese tipo de disipador son:



[Disipador Fischer Elektronik Negro](#)



[Disipador Seifert Negro](#)

Figura 165. Imágenes diferentes disipadores [53][54]

Sin embargo, para cumplir con los 50°C, es más complicado encontrar un disipador para este tipo de encapsulado, si se puede encontrar en mercado disipadores para TO-220 de hasta 30°C/W, el cual va atornillado al dispositivo para mejorar la superficie de contacto.



[Disipador Fischer Elektronik Negro, 36K/W](#)

Figura 166. Imágenes diferentes disipadores [55]

Ya con todos los componentes preparados, es hora de profundizar en el montaje.

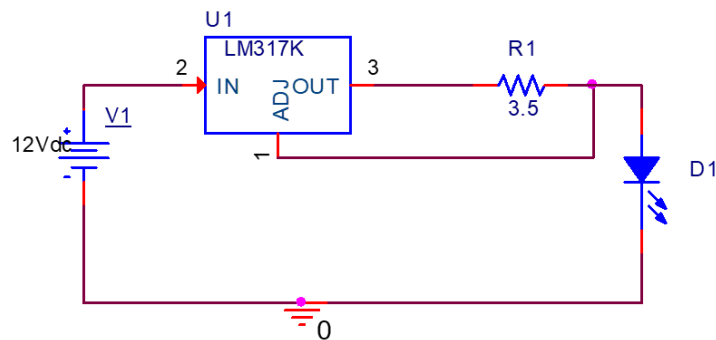


Figura 167. LM317 Esquemático en Pspice

Medir tensión que circula por el LED, corriente y tensión de alimentación

Tensión aliment. (V)	VLED (V)	IF MEDIDA (mA)
6	2,92	286
8	3	381,26
9	3	381,5
10	3	381,6
12	3	381,8

LM317 REGULADOR DE CORRIENTE

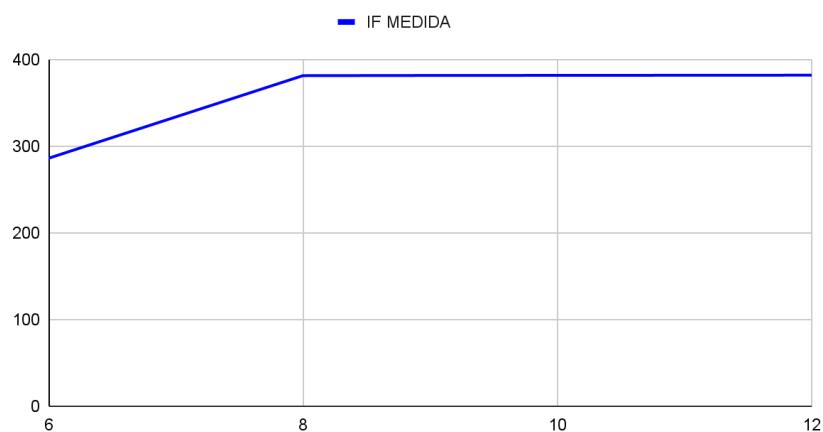


Figura 168. Corriente por LM317 a diferentes tensiones de alimentación

¿Qué pasaría si entre la resistencia y el ánodo del LED conectamos un transistor excitado con una señal pulsante?

Realizado dicho ensayo con los valores para un LED de 20mA, $R_1 = 62,5\Omega$, valor comercial $R_1 = 68\Omega$

Tensión aliment. (V)	PWM %	IF MEDIDA (mA)
12	0	18,61
	20	14,83
	30	12,96
	40	11,11
	50	9,26
	60	7,39
	70	5,55
	80	3,69
	100	0

LM317 REGULADOR DE CORRIENTE CON PWM

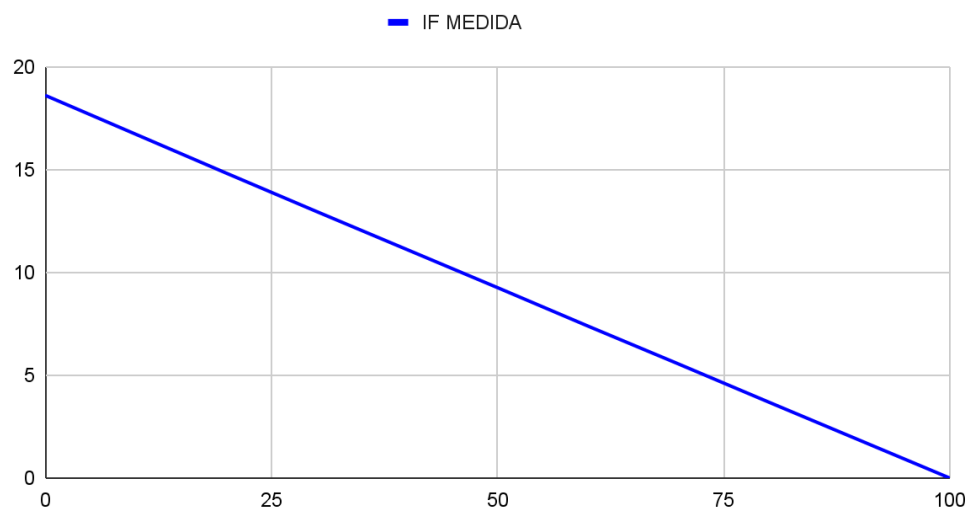
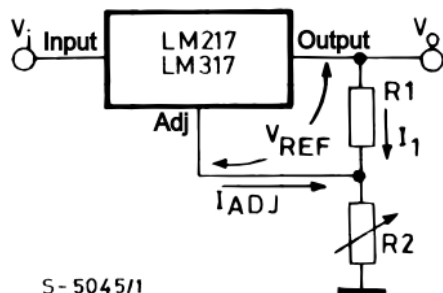


Figura 169 Corriente en LM317 con señal PWM

Cómo estudiado con anterioridad, hemos diseñado un circuito en el que la corriente sin excitación externa presenta su máximo valor según calculado, pero cuando se introduce una señal cuadrada excitando a un transistor cuyo drenador en señal alta realiza un cortocircuito con masa, robando toda la corriente que pasaría por el LED. Con esto se puede controlar la luminosidad del diodo.

5.2.2. LM317 REGULADOR DE Tensión

El siguiente circuito a destacar hace trabajar al driver como regulador de tensión, gracias a la tensión de ajuste del driver y un divisor de tensión, la tensión de salida es calculada.



$$V_O = V_{REF} (1 + R_2/R_1) + I_{ADJ} R_2$$

S- 5045/1

Figura 170 Extracto datasheet LM317

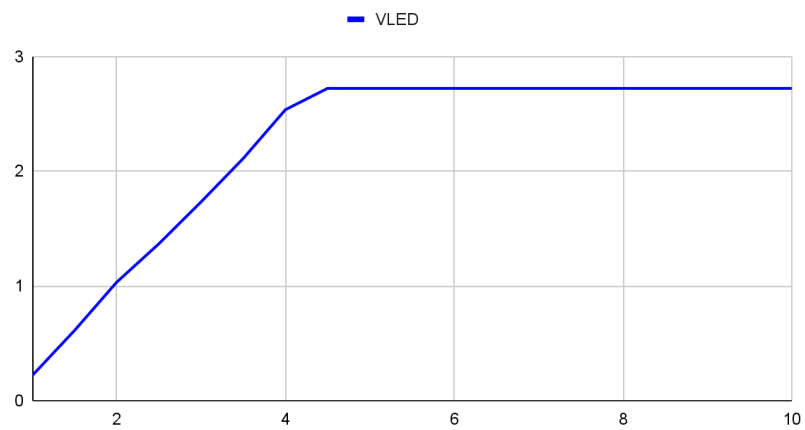
La corriente de ajuste en el cálculo puede despreciarse pues está ajustada a unos valores para no tenerla en cuenta (100µA).

Para la tensión del LED blanco de la práctica 1, $V_{LED} = V_o = 3V$, ajustando el valor de $R_2 = 330\Omega$, obtenemos un valor de $R_1 = 235,7\Omega$, como resistencias comerciales de este valor no hay disponibles en el laboratorio y con el fin de demostrar que el driver mantiene una tensión constante, es más favorable elegir la resistencia de valor superior $R_1 = 270\Omega$ para evitar además superar la corriente máxima del LED.

Los valores de tensión obtenidos en el experimento hecho en el laboratorio se ven reflejados en la siguiente tabla:

Tensión alim. (V)	VLED (V)	Tensión alim. (V)	VLED (V)
1	0,219	6	2,722
1,5	0,611	6,5	2,722
2	1,032	7	2,722
2,5	1,367	7,5	2,722
3	1,732	8	2,722
3,5	2,111	8,5	2,722
4	2,536	9	2,722
4,5	2,722	9,5	2,722
5	2,722	10	2,722
5,5	2,722		

LM317 REGULADOR DE TENSIÓN

*Figura 171. Comportamiento V-I LED*

Los cálculos realizados para la tensión de salida con los valores de resistencias elegidos, devuelven un valor de 2,777V, los cuales se reflejan en la tabla y la gráfica anterior.

5.3. LM78XX

El tercer y último driver a analizar en ésta práctica presenta al contrario de los demás, un solo encapsulado para las múltiples opciones de driver a elegir según su encapsulado.

Product Number	Output Voltage Tolerance	Package	Operating Temperature	Packing Method
LM7805CT	±4%	TO-220 (Single Gauge)	-40°C to +125°C	Rail
LM7806CT				
LM7808CT				
LM7809CT				
LM7810CT				
LM7812CT				
LM7815CT				
LM7818CT				
LM7824CT	±2%		0°C to +125°C	
LM7805ACT				
LM7809ACT				
LM7810ACT				
LM7812ACT				
LM7815ACT				

Figura 172. Extracto datasheet LM78XX [56]

Características principales:

Corriente de salida superior a 1A.

Tensiones de salida: 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V

Según la terminación XX del driver que se elija tendrá una salida de tensión u otra.

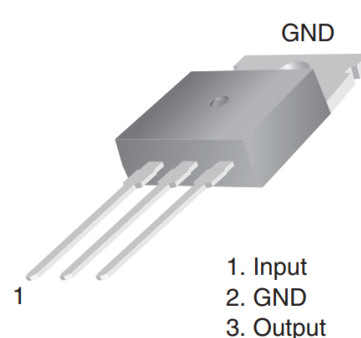


Figura 173. Extracto datasheet LM78XX, pineado [56]

Dentro del [DATASHEET](#) hay múltiples opciones de driver, tantas como tensiones de salida hay. Ésto hay que tenerlo en cuenta a la hora de realizar el análisis de las características del que esté en uso.

5.3.1. LM78XX REGULADOR DE Tensión

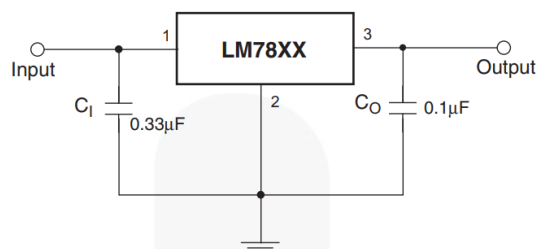


Figure 9. Fixed-Output Regulator

Figura 174. Extracto datasheet LM78XX, esquema [56]

El montaje que conlleva es más que sencillo, la tensión de salida será aquella que nos proporcione la patilla 3 (OUTPUT) y viene dado el valor por el valor de XX.

En el caso del que disponemos en el laboratorio es el driver LM7805, la tabla obtenida en el laboratorio refleja una linealidad una vez superada la caída de tensión interna del driver.

Este valor se llama DROPOUT Voltage, alrededor de 2V pero con unas condiciones de corriente mucho mayor de la corriente que se ha consumido durante el experimento.

Electrical Characteristics (LM7805)

Refer to the test circuit, $-40^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $V_I = 10\text{ V}$, $C_I = 0.1\text{ }\mu\text{F}$, unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_{DROP}	Dropout Voltage	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$, $I_O = 1\text{ A}$		2		V

Figura 175. Extracto datasheet LM78XX [56]

Tensión aliment. (V)	VLED (V)	Tensión aliment. (V)	VLED (V)
2	0,00064	5,5	4,688
2,5	0,0367	6	5,061
3	0,960	6,5	5,061
3,5	2,743	7	5,061
4	3,302	7,5	5,061
4,5	3,777	8	5,061
5	4,326		

LM7805 REGULADOR DE TENSIÓN

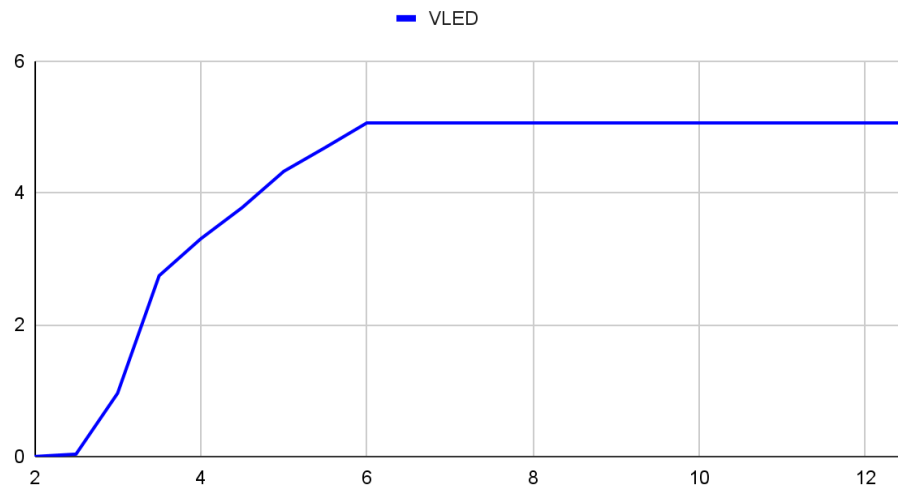


Figura 176. Tensión de salida del regulador a diferentes tensiones de alimentación

Como se ha mencionado antes de rellenar la tabla, la gráfica refleja una perfecta linealidad una vez superada la caída de tensión interior del driver. Se aprecia como no ha sido necesario llegar a los 2V de DROPOUT VOLTAGE debido a los consumos del circuito.

Es un componente perfecto para mantener una tensión fija de salida sin alteraciones por fluctuaciones en la red.

5.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE

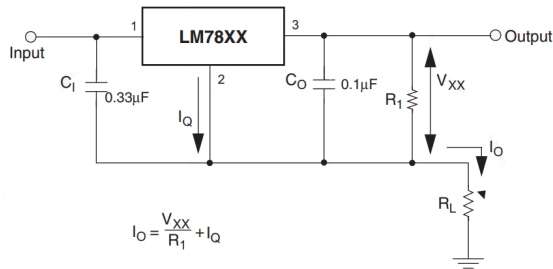


Figure 10. Constant Current Regulator

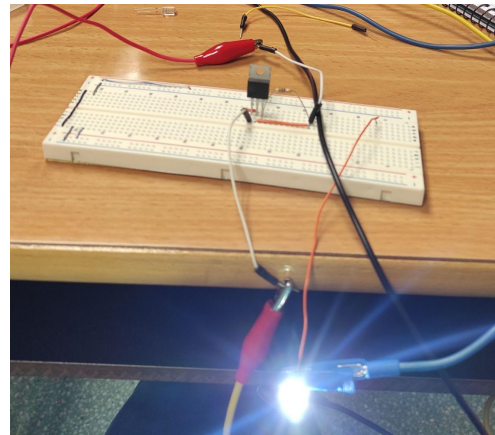


Figura 177. Extracto datasheet [56]

Figura 178. Montaje laboratorio

Haciendo incidencia en la imagen de la derecha, imagen tomada en el laboratorio, se ha diseñado la práctica para encender un LED de potencia, cuya corriente se decidió para el experimento que fuese 100mA. Recordar que al trabajar con valores de resistencia bajos y corrientes altas es preferible usar resistencia de potencia al menos superior al medio vatio.

$R_1 = 50\Omega \rightarrow$ Usada la de valor comercial $R_1 = 56\Omega$, a pesar de devolver un valor inferior para la corriente, realizando el cálculo total en el cual consideramos el valor de $I_q = 5mA$, la corriente total resultante es de $I_o = 960mA$

Tensión aliment. (V)	V_o (V)	IF MEDIDA (A)	Tensión aliment. (V)	V_o (V)	IF MEDIDA (A)
2	0	0	7	2,819	0,5180
3	0	0	8	3,73	0,703
4	0	0	9	4,64	0,8835
5	0	0,0002	10	5,01	0,973
6	1,907	0,00894	11	5,01	0,973

LM7805 REGULADOR DE CORRIENTE

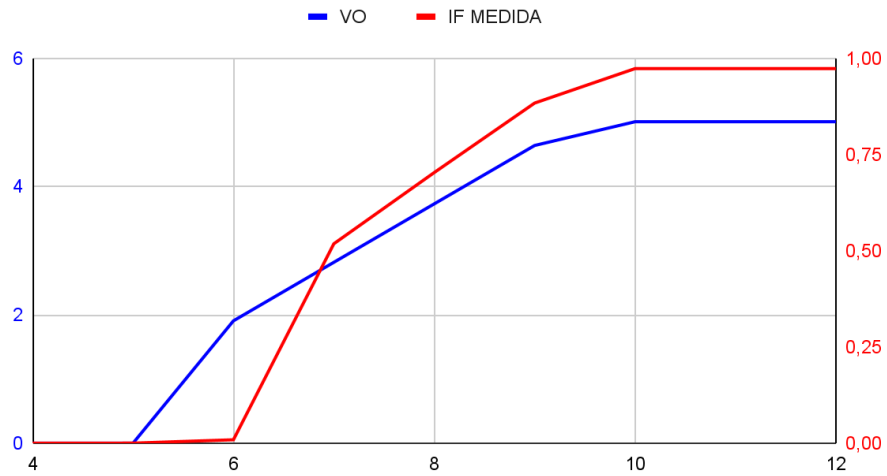


Figura 179. Corriente y tensión de salida en LM7805

Terminados montajes en laboratorio, se da paso a las simulaciones realizadas con PSPICE sobre los diseños realizados.

En todos los driver analizados podemos sacar en claro la asombrosa linealidad que presentan frente a los circuitos montados en la Práctica 2.

6. SIMULACIONES

6.1. CL2N3

Debido a la dificultad de encontrar el modelo de este circuito integrado para poder trabajarlo en PSPICE, no es necesaria ninguna simulación

6.2. LM317

6.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE

En esta simulación usando el driver utilizado en el laboratorio, se busca repetir las condiciones que allí se obtuvieron.

La tarea es realizar el diseño esquemático del circuito como regulador de corriente y posteriormente calcular el valor de resistencia. El LED es de 1W como el usado también en el laboratorio.

$$R_1 = \frac{V_{Adj}}{I_{LED}} = \frac{1,25}{0,350} = 3,5\Omega$$

Usando valores comerciales, la resistencia tendría que tener un valor de $R_1 = 3,7\Omega$

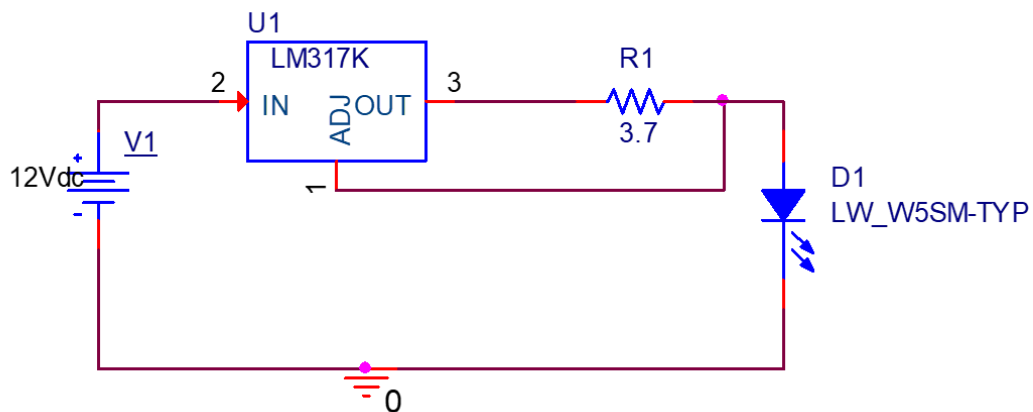


Figura 180. LM317 en Pspice

Se configura el análisis como *BIAS POINT*, de ésta manera se hace un extracto de potencias, tensiones y corrientes que hay en los componentes en análisis.

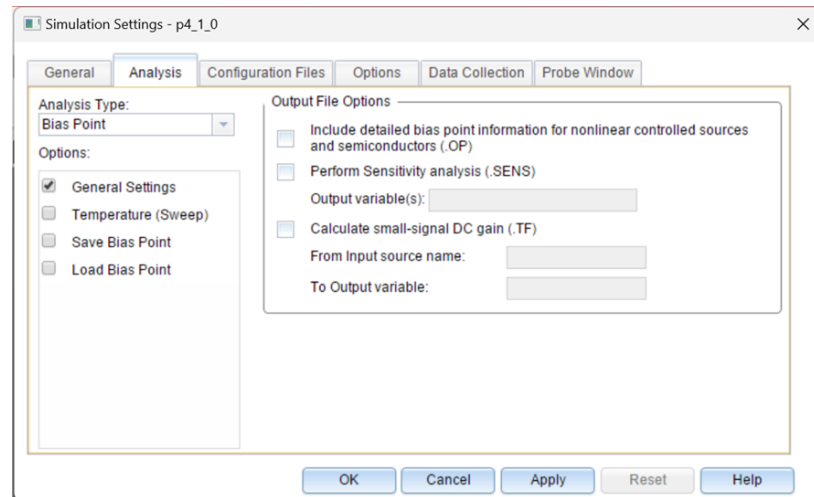


Figura 181. Configuración análisis en Bias point Pspice

El resultante es el siguiente:

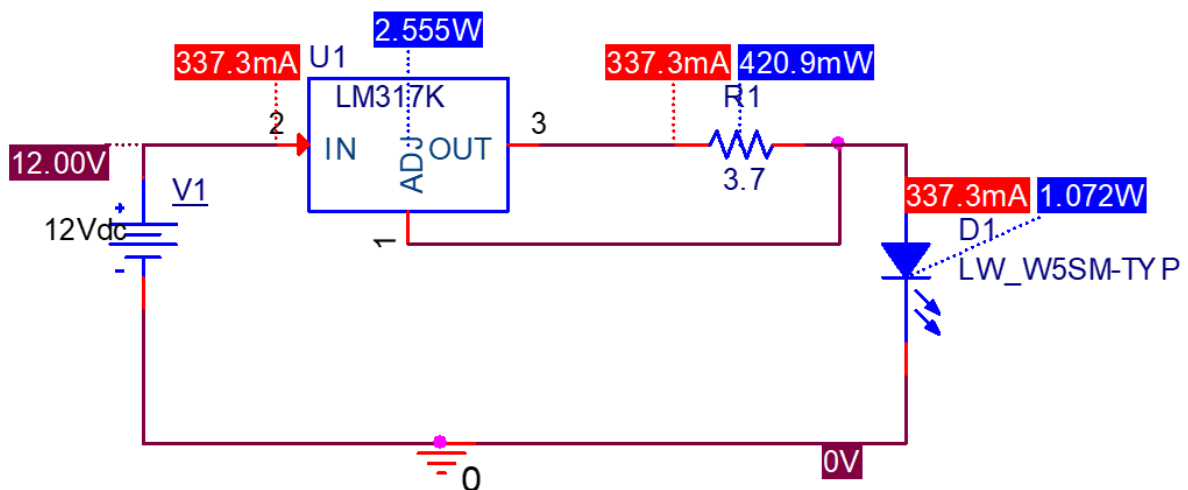


Figura 182. Resultados obtenidos en la simulación

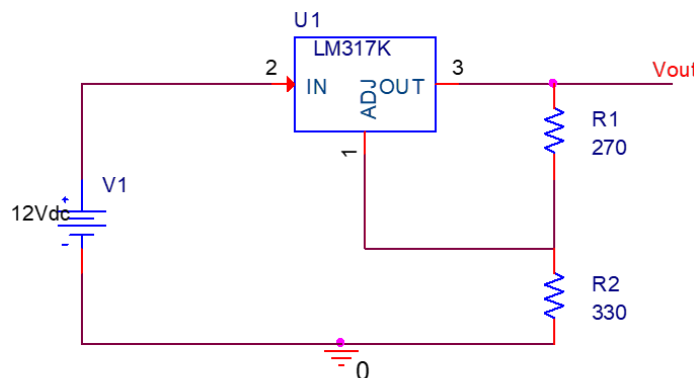
- La potencia disipada por el driver, coincidente con los cálculos: 2,6W
- La potencia a través de la resistencia, coincidente con los cálculos: 0,4W
- El diodo en su potencia nominal de 1W.

Ésto hace concluir la simulación con los mismos resultados de la teoría en el laboratorio y validar así todas y cada una de las medidas realizadas.

6.2.2. LM317 REGULADOR DE TENSIÓN

El siguiente circuito, con la topología reguladora de tensión, incita a realizar un barrido de tensión de alimentación, las resistencias tienen el mismo valor que calculado para el laboratorio, como lo que interesa es el valor de la tensión de salida, no importa si analizar el circuito con carga o sin ella.

Diseñamos en el software el esquemático de la práctica:



$$V_{out} = 1.25 (1 + R2/R1) + I_{adj} * R2$$

Figura 183. Circuito a simular en Pspice

Para este barrido, se configura el análisis para ello, con un barrido en continua sobre la fuente de alimentación V1, estableciendo valores de inicio, fin e incremento, como se ve en la siguiente imagen:

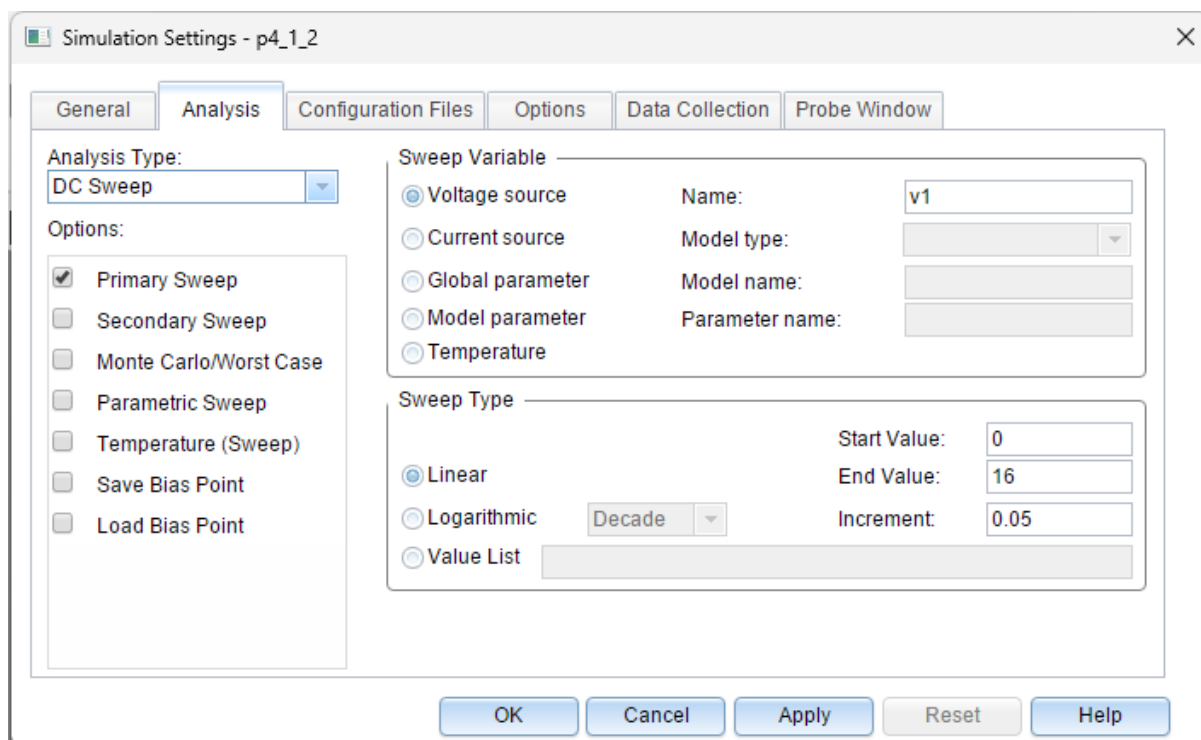


Figura 184. Configuración de barrido en continua en Pspice

El resultado es una gráfica perfecta que representa el incremento de tensión una vez superada la tensión de DROPOUT del driver, hasta que obtenida la tensión objetivo se convierte en estable.

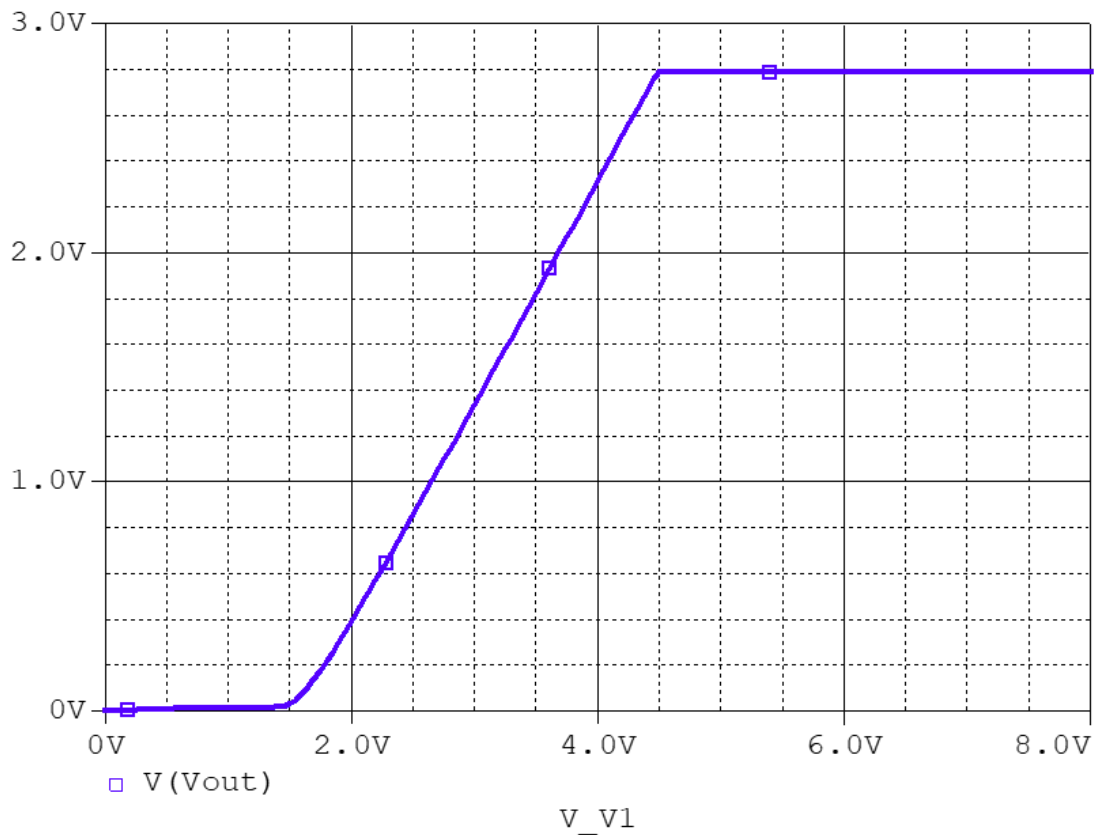


Figura 185 Resultado barrido en continua simulado en Pspice

¿Qué sucedería si, durante una tensión estable sufre el circuito un incremento de ésta? ¿Y si se redujera la tensión?

Para ello se realiza el análisis con una onda modulable que nos permite configurar sus valores en tiempo y valor. Dicha fuente se llama VPWL.

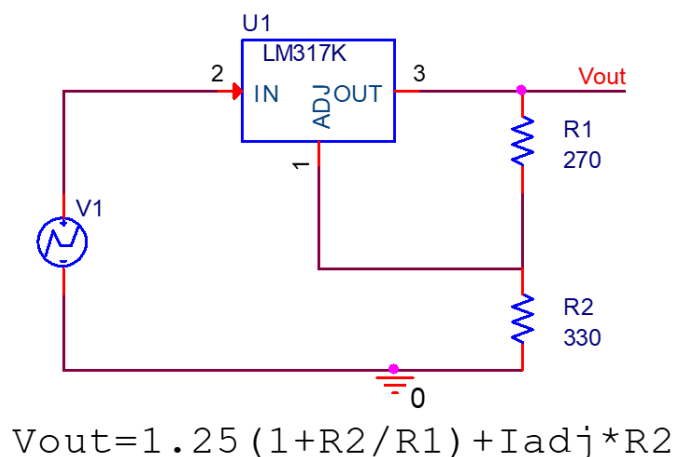


Figura 186. Esquema Pspice con fuente pulsante

Presenta la configuración que sigue:

PieceWise Linear Sources (PWL)

☒ Voltage PWL ☐ Current PWL

☐ PWL File ...

☒ PWL Points

Analog Value Time Pairs

T1	0	V1	12
T2	6m	V2	12
T3	6.01m	V3	16
T4	8m	V4	16
T5	8.01	V5	12

Add Additional PWL points

Signal Repetitions

☒ None ☐ Repeat Forever ☐ Repeat

Advance Options

Value Scaling Factor

Time Scaling Factor

AC ☐

DC ☐

Time Value for 6th pair

Update Close Help

Figura 187. Configuración fuente pulsante Pspice

Estando constante a 12V en el instante 6.01ms incrementa hasta los 16V para 2ms después volver estable a 12V.

Su gráfica refleja un transitorio en ese instante de 6ms pero en la reducción de tensión en el instante 8ms el driver no altera su respuesta.

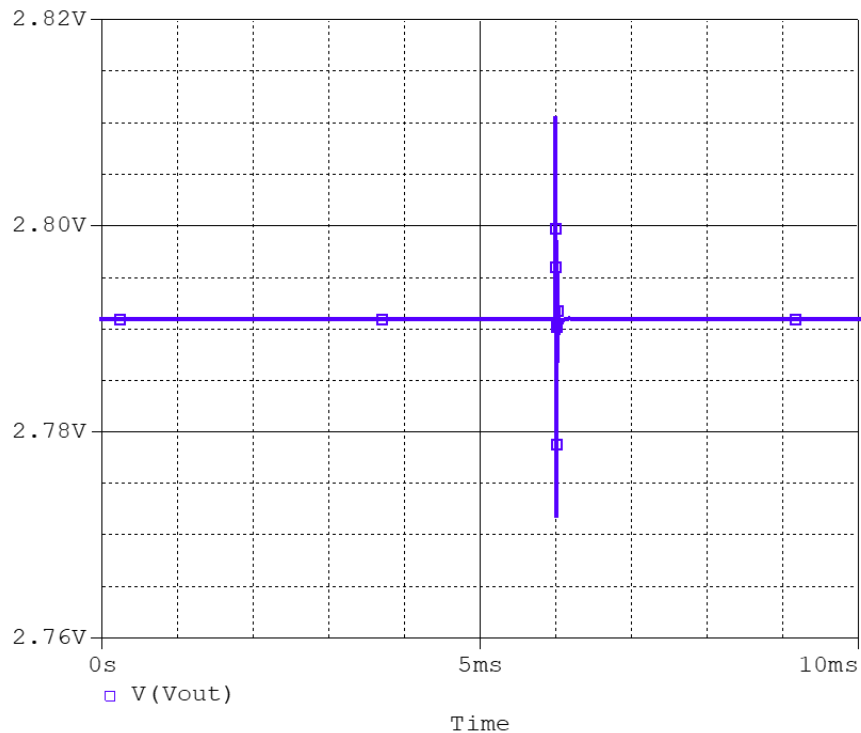


Figura 188. Respuesta del driver ante un pulso fuerte

Siendo analizada en profundidad la gráfica, refleja un pico de tensión de 2mV pero frente al ojo humano es despreciable una alteración en la posible iluminación del LED porque tiene una duración inferior a los 100 μ s.

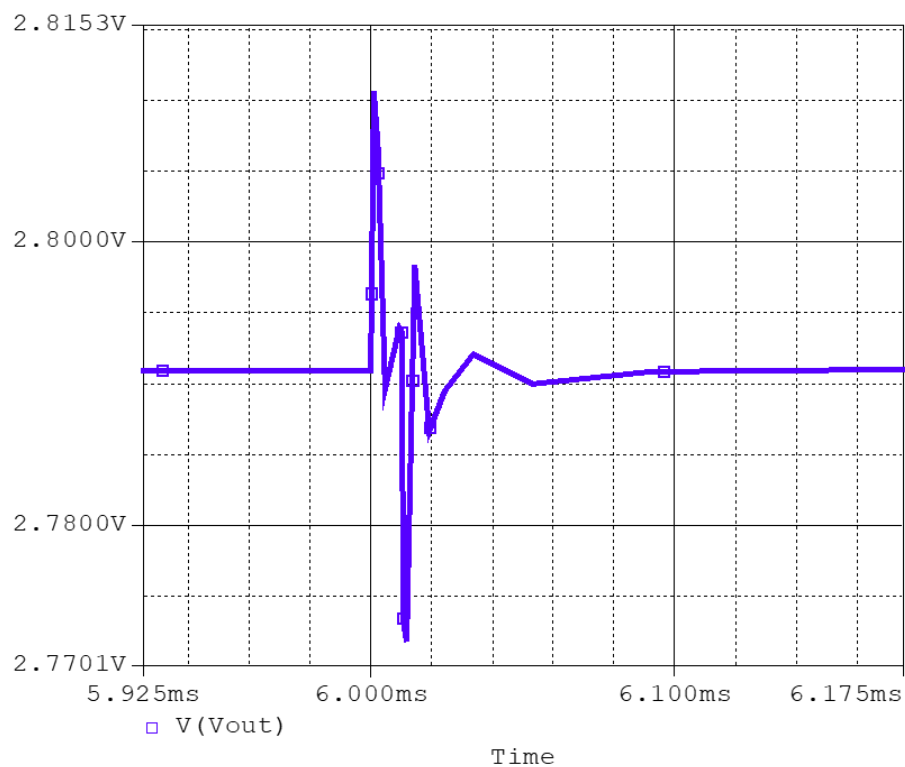


Figura 189. Detalle de la respuesta del driver ante el pulso

6.3. LM78XX

El último paso para terminar la práctica es simular el driver LM78XX en las dos topologías que se han ensayado en el laboratorio.

6.3.1. LM78XX REGULADOR DE Tensión

Presentado el esquemático del circuito y definido el punto de salida como Vout para reflejarlo en la gráfica, el siguiente paso es definir el modo de simulación.

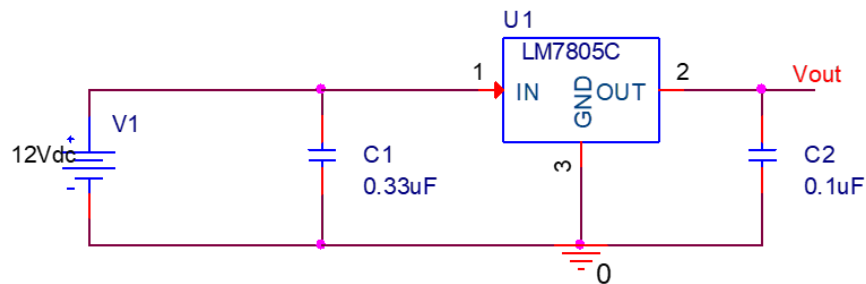


Figura 190. Esquema LM7805 en Pspice

Siguiendo los pasos de las simulaciones anteriores, es interesante analizar en barrido de continua para la fuente de alimentación, el comportamiento del driver en su salida. Fijados los parámetros del barrido desde 0V hasta 16V, con un incremento del 0.05V

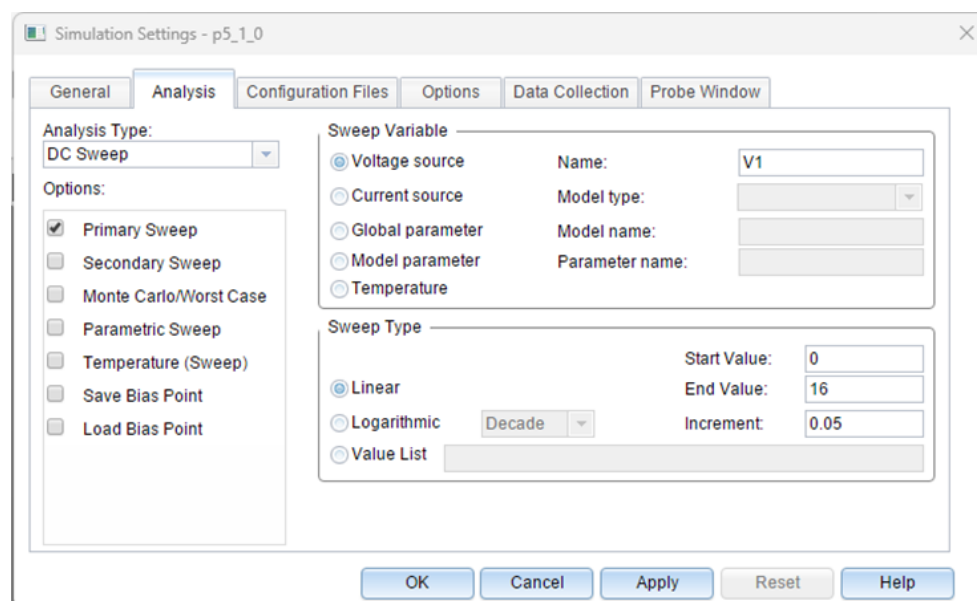


Figura 191. Configuración del barrido en continua.

El resultado, como era de esperar tras haber realizado el experimento del laboratorio, refleja un punto de inflexión en los 6,5V donde se vuelve constante para todos los valores de tensión superiores.

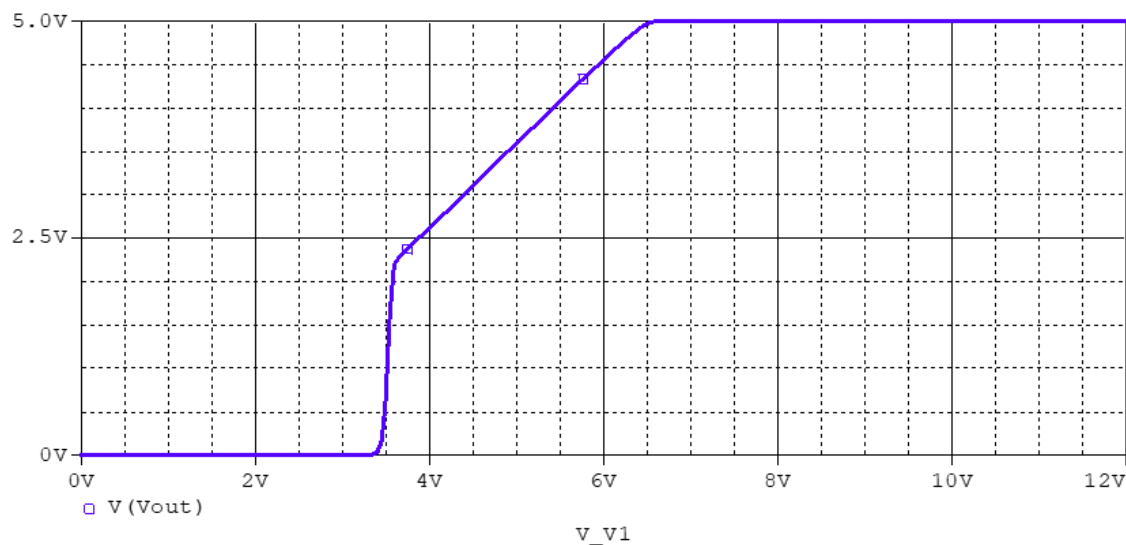


Figura 192. Barrido en continua

Este punto de inflexión se calcula como la tensión que aporta el propio driver más la caída de tensión interna que éste tiene, $V_{DROPOUT} \approx 2V$.

Si se realiza la misma pregunta que en la simulación con el driver LM317, ¿qué comportamiento se obtendría si la fuente de alimentación sufriera alteraciones en su tensión?

Para ello, nuevamente se escoge la fuente VPWL para analizar el circuito.

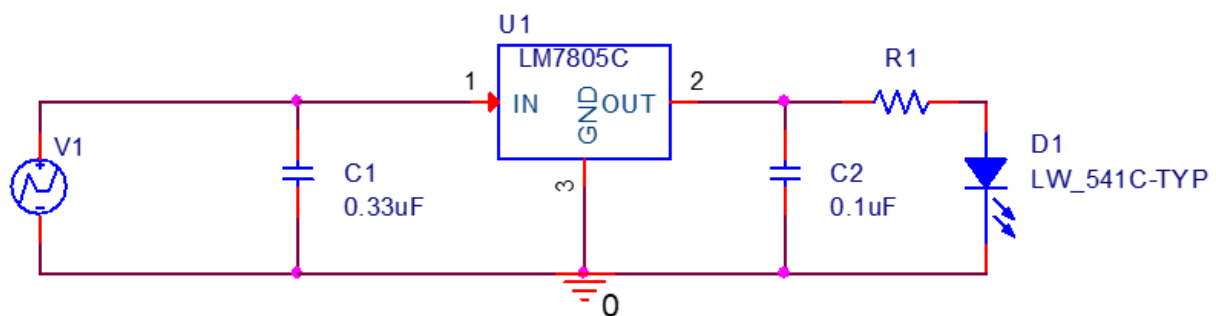


Figura 193. Circuito LM7805 con fuente pulsante

Se parametriza la fuente con los valores que se deseen analizar:

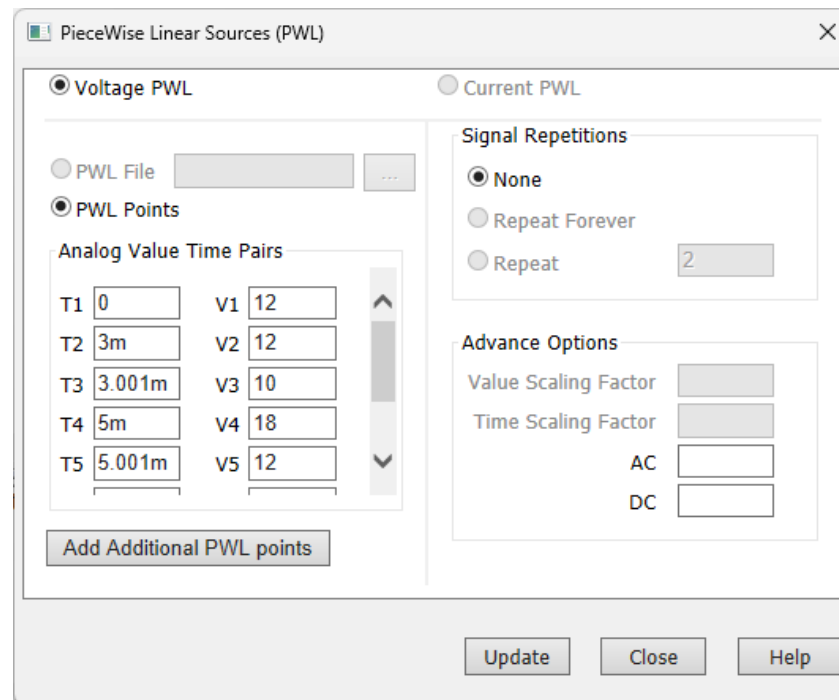


Figura 194. Configuración fuente pulsante

Éste es el resultado, en rojo la tensión que circula por la resistencia, en azul la tensión de alimentación y en verde la corriente por el diodo, el objeto de estudio.

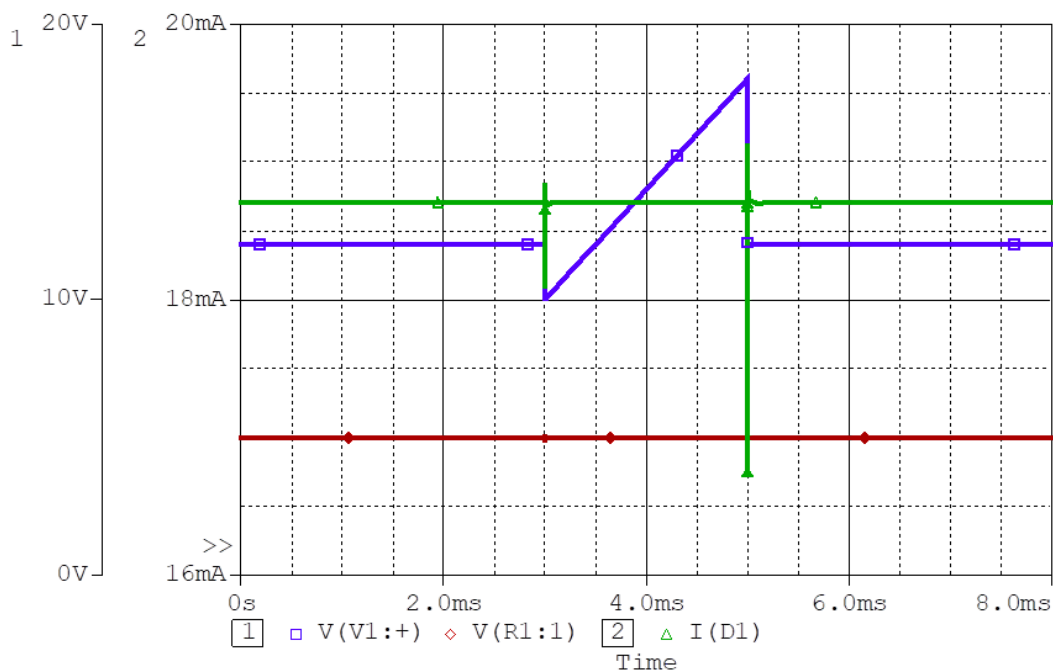


Figura 195. Respuesta corriente por el driver ante pulso creciente en fuente alimentación

Es observable y sufre dos picos de corriente el diodo, ello se debe a las alteraciones tan rápidas a las que se ha sometido el análisis, mientras que durante el incremento lineal de tensión de la fuente de alimentación, la corriente no ha sufrido ningún movimiento en su linealidad.

6.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE

Última topología a analizar durante estas simulaciones de la práctica 3.

El circuito formado por el driver y la resistencia que ajusta la corriente de salida, la cual viene regulada por la tensión del propio driver, el valor de resistencia y una corriente adicional de 5mA, para corrientes altas es despreciable pero para analizar el LED elegido, en su nominal posee 20mA, entonces si es necesario tener en cuenta la corriente adicional.

Se genera el esquemático:

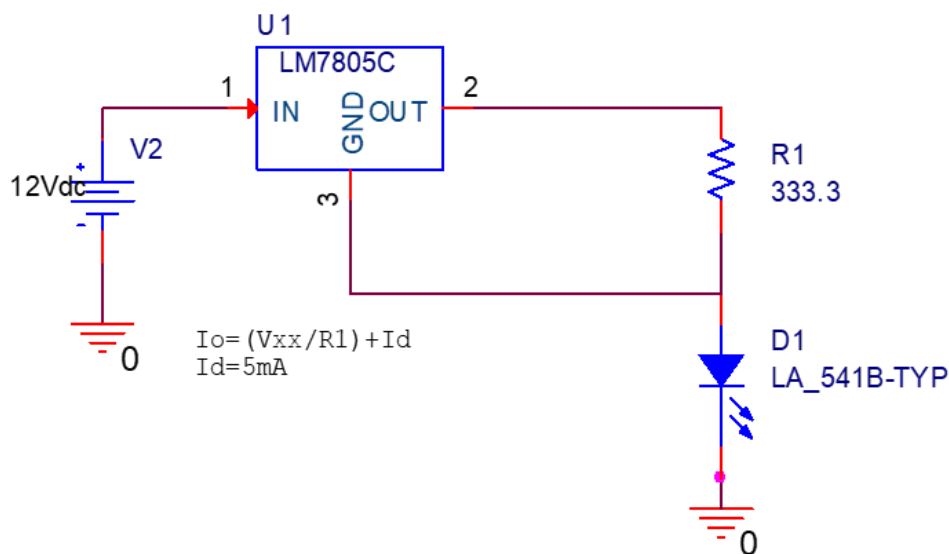


Figura 196. Esquema LM7805 como regulador de corriente

Se establece otro barrido de continua para la fuente de alimentación, así se puede estudiar el comportamiento a diferentes valores de tensión.

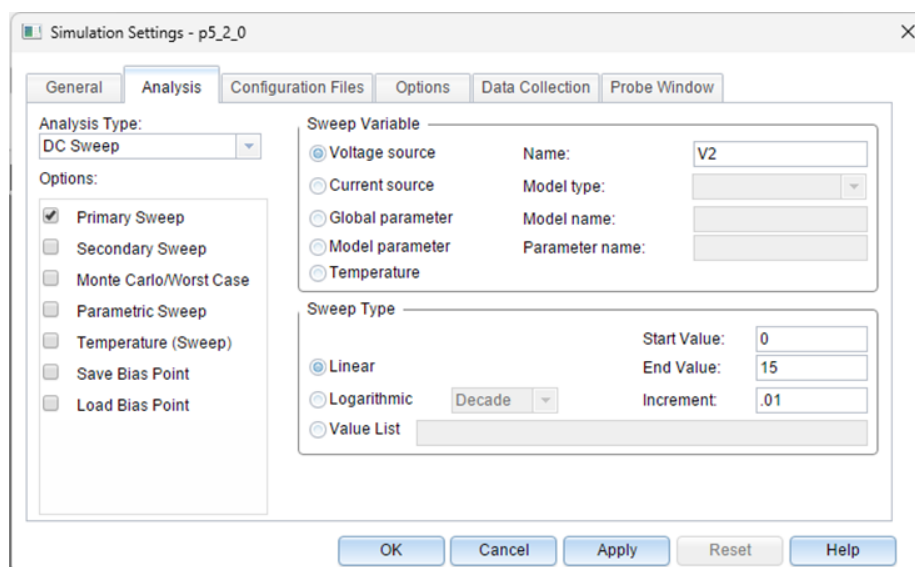


Figura 197. Configuración de barrido en continua

El resultado, igual que en todas las simulaciones realizadas en esta práctica, no ha deparado ninguna sorpresa, mostrando su linealidad una vez superada la tensión de 5V del driver y los 3,5V del LED.

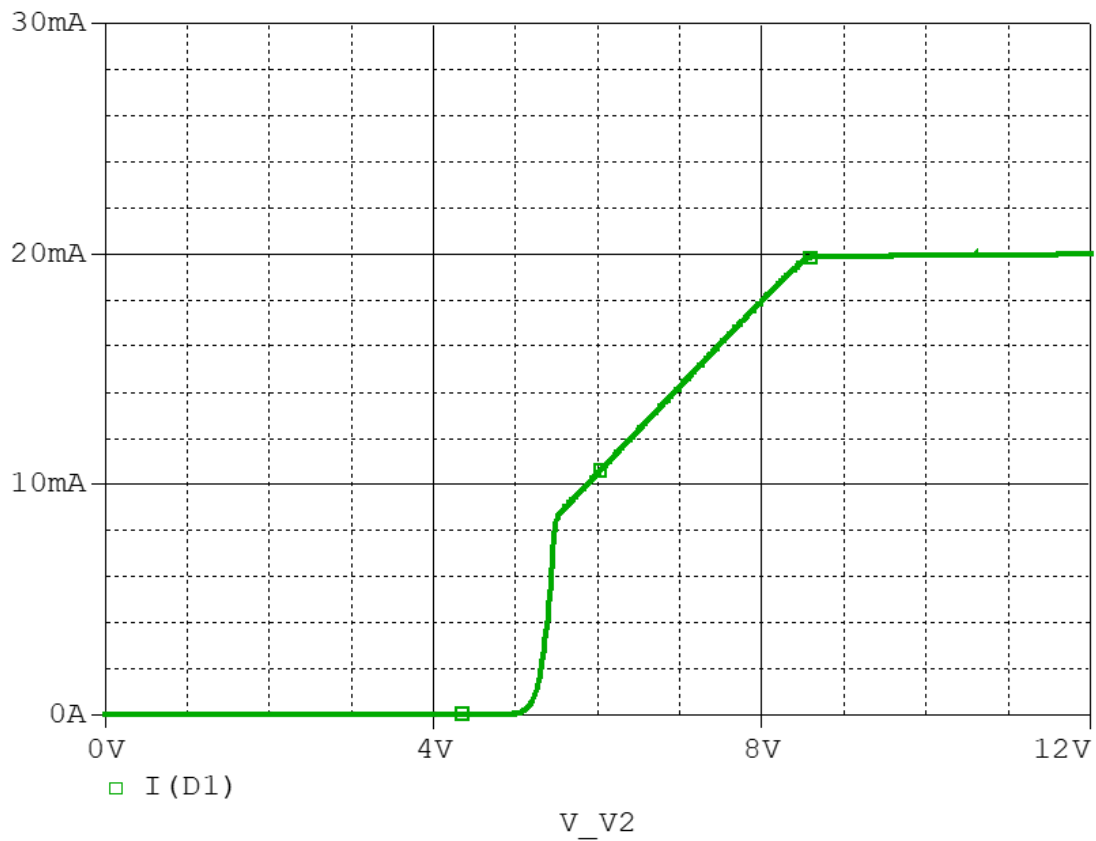


Figura 198. Respuesta del barrido en continua

7. CONCLUSIONES

El objeto de esta práctica era estudiar los driver lineales y sus características frente a impulsos externos, con el fin de no alterar el comportamiento de los LED cuando estén ubicados en el coche, reglamentariamente y por seguridad, la luz del automóvil no puede ir fluctuando, que es lo que sucedería al recibir alteraciones de tensión con los circuitos montados en la práctica 1.

Se ha demostrado el comportamiento tan eficaz que presentan los driver analizados, todos presentaban linealidad en tensiones alrededor de la aportada por una batería de coche (13,5V).

Aunque éstos driver no cumplen condiciones de automoción, pero perfectamente podrían desarrollar una aplicación casera con luminarias LED.

Recordar que el driver es excitado por corriente, así pues, es más fácil de controlar por su corriente que por su tensión, ya que éstas cambian según el color y el encapsulado del mismo.

El estudio de las topologías reguladores de tensión nos son válidas para alimentar driver más complejos que encontramos dentro de las PCB de automoción, los cuales suelen gestionar varias ramas de LED para hacer las funciones de running en los intermitentes o controlar los segmentos de los módulos MATRIX BEAM.

Práctica 3. DRIVER REGULADORES

1. INTRODUCCIÓN

En esta práctica se estudia el funcionamiento de algunos de los diferentes circuitos integrados que hay en el mercado como reguladores lineales y según la topología del circuito que le acompañe puede funcionar como reguladores de tensión o de corriente.

2. OBJETO DE LA PRÁCTICA

Aprender los diferentes circuitos que nos proporcionan los fabricantes con los datasheet de los componentes y el comportamiento que conlleva cada topología.

3. DESCRIPCIÓN BÁSICA

Se van a estudiar siete diferentes funcionamientos con tres drivers distintos. CL2N3, LM317 y L78XX

4. LISTADO DE MATERIAL

- ☐ Fuente de alimentación DC 30V 3A
- ☐ Multímetro precisión igual o mayor al 0,1%
- ☐ LED azul, rojo y blanco de 20mA.
- ☐ C.I. CL2N3
- ☐ C.I. LM317
- ☐ C.I. L78XX
- ☐ Resistencias serie E12.

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

El desarrollo de la presente práctica se basa en el montaje de diferentes tipos de circuitos con diferentes circuitos integrados.

5.1. C2LN3

Este C.I. presenta diferentes encapsulados, pero para el laboratorio el que más se adapta es TO-92, por su capacidad de pincharse en la placa de experimentación.

[DATASHEET](#)

Package Type

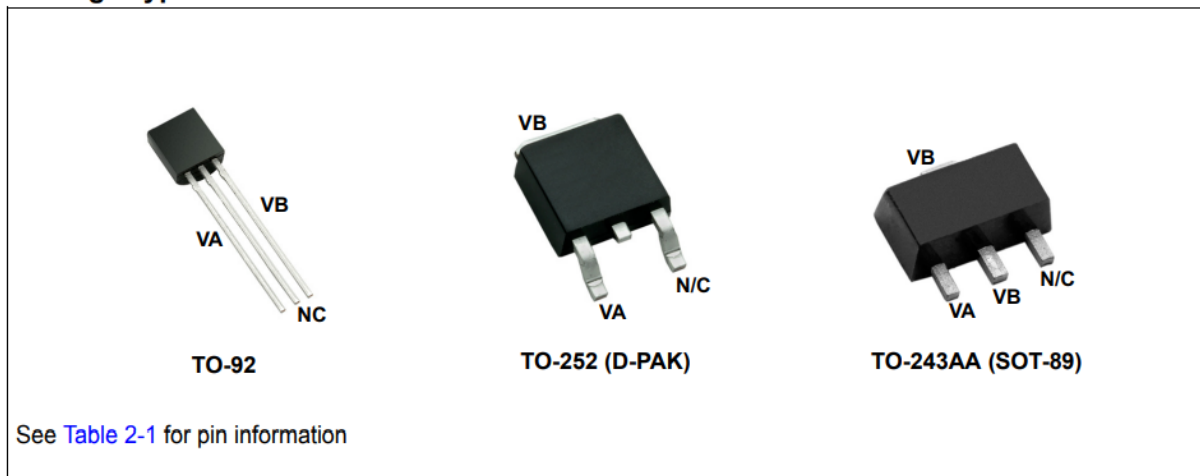


Figura 199 Encapsulados CL2N3 [51].

Siguiendo con sus características, su rango de alimentación oscila entre los 5V y los 90V, en dicho rango tiene una salida constante de $20\text{mA} \pm 10\%$.

Estas características son las que hay que comprobar en nuestro ensayo, variar la tensión de alimentación y comprobar que la corriente que circula por el LED es la misma.

Typical Application Circuit

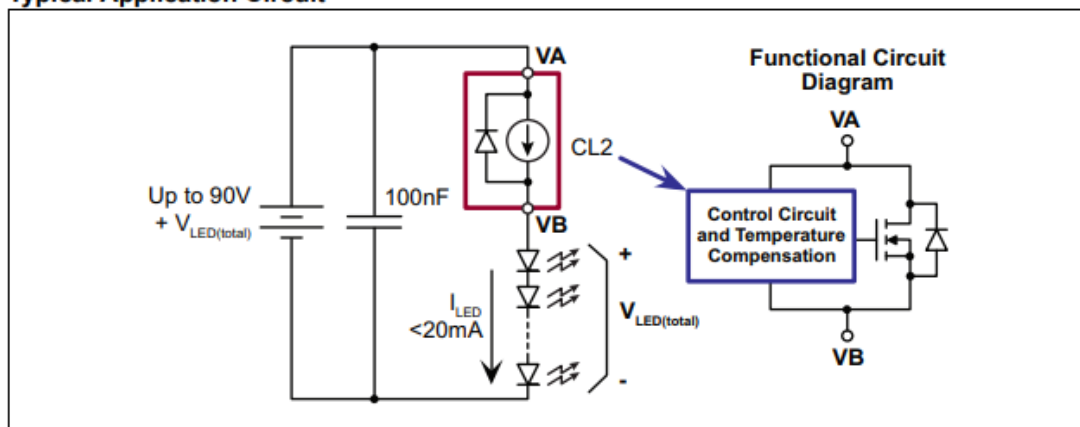


Figura 200. Estructura propuesta para CL2N3 [51]

Realizar el montaje en el laboratorio del circuito anterior con 1 led blanco y analizar su comportamiento desde 0V hasta 20V, comprobar que el dispositivo funciona como se refleja en su hoja de características.

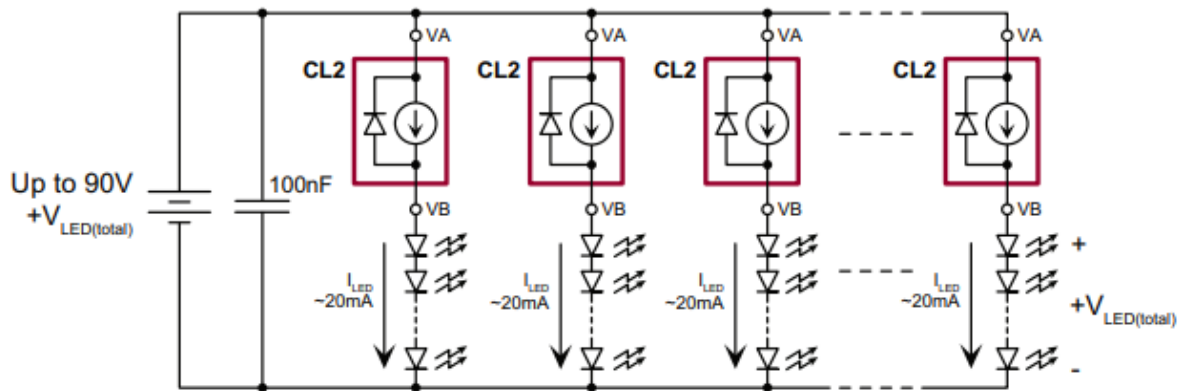
Para ello medir la curva V-I del diodo LED:

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)	Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA (V)	IF MEDIDA (mA)
1			11		
2			12		
3			13		
4			14		
5			15		
6			16		
7			17		
8			18		
9			19		
10			20		

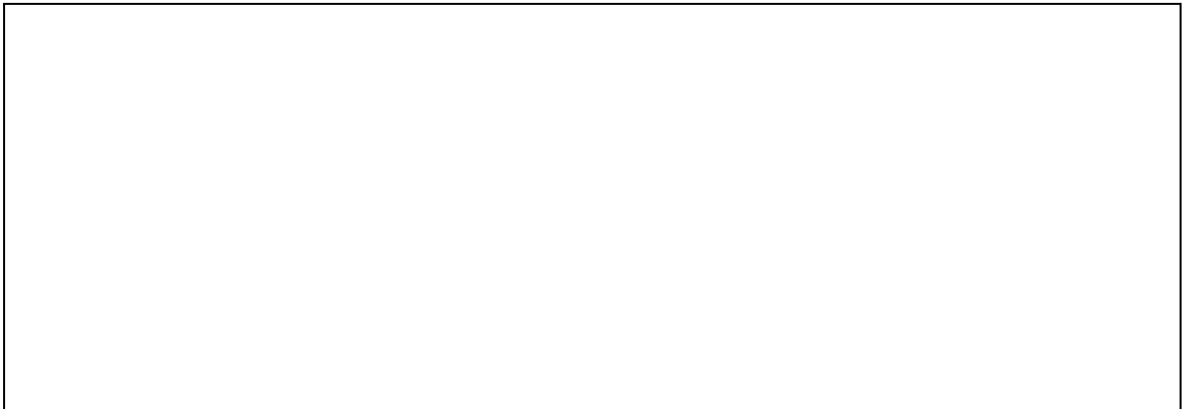
Insertar gráfica V-I con los datos obtenidos:



Para comprobar si la lectura de la hoja de característica ha sido comprensiva, realizar el montaje de 9 led, pueden ser de diferentes colores, y realizar éste con el menor número de componentes posibles y sin superar los 14V de alimentación. Por todos ellos debe circular 20mA.



Insertar foto del circuito diseñado:



¿Qué tensión circula por cada rama? ¿Qué tensión cae en los LED de cada rama? ¿Cuántos LED hay en cada rama?

Si hay capacidad en el laboratorio, usar varios multímetros para agilizar las medidas.

Tensión aliment. (V)	VLED MEDIDA RAMA 1 (V)	IF MEDIDA RAMA 1 (mA)	VLED MEDIDA RAMA 2 (V)	IF MEDIDA RAMA 2 (mA)	VLED MEDIDA RAMA 3 (V)	IF MEDIDA RAMA 3 (mA)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						

Explica que circuito plantearías para alimentar un diodo de potencia a su corriente nominal, la cual es superior a 20mA. Introducir el esquemático en el siguiente cuadro.

5.2. LM317

Este C.I. presenta diferentes encapsulados, pero para el laboratorio el que más se adapta es TO-200, por su capacidad de ser pinchado en la placa de experimentación.

[DATASHEET](#)

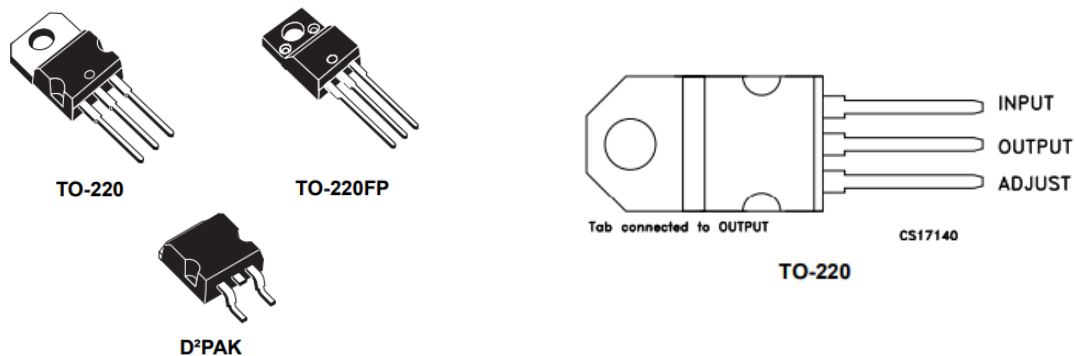


Figura 201. Encapsulados y pineado LM317 [52]

Ya conocido su pineado, hay que analizar sus características para profundizar en el comportamiento del driver y entender la manera de actuar en cada circuito que se plantea a continuación.

Máx. diferencial de voltaje, entrada - salida: 40V

Voltaje en el pin de referencia 1.25V

Corriente máxima de salida 2.2A

$V_I - V_O = 5\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $I_{MAX} = 1.5\text{ A}$ and $P_{MAX} = 20\text{ W}$, $T_J = 0\text{ to }125\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified.

Table 4. Electrical characteristics for LM317

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
ΔV_O	Line regulation	$V_I - V_O = 3\text{ to }40\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.01 0.02	0.04 0.07	%/V
ΔV_O	Load regulation	$V_O \leq 5\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		5 20	25 70	mV
		$V_O \geq 5\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.1 0.3	0.5 1.5	%
I_{ADJ}	Adjustment pin current			50	100	μA
ΔI_{ADJ}	Adjustment pin current	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$		0.2	5	μA
V_{REF}	Reference voltage (between pin 3 and pin 1)	$V_I - V_O = 2.5\text{ to }40\text{ V}$ $I_O = 10\text{ mA to }I_{MAX}$ $P_D \leq P_{MAX}$	1.2	1.25	1.3	V
$\Delta V_O/V_O$	Output voltage temperature stability			1		%
$I_{O(min)}$	Minimum load current	$V_I - V_O = 40\text{ V}$		3.5	10	mA
$I_{O(max)}$	Maximum load current	$V_I - V_O \leq 15\text{ V}$, $P_D < P_{MAX}$ $V_I - V_O = 40\text{ V}$, $P_D < P_{MAX}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	1.5 0.4	2.2		A
eN	Output noise voltage (percentage of V_O)	$B = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.003		%
SVR	Supply voltage rejection ⁽¹⁾	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $f = 120\text{ Hz}$		$C_{ADJ} = 0$ $C_{ADJ} = 10\text{ }\mu\text{F}$	65 80	dB

1. C_{ADJ} is connected between adjust pin and ground.

Figura 202. Extracto datasheet [52]

5.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE

La primera topología que se plantea interesante de estudio en este proyecto es muy simple y hace trabajar al driver como un regulador de corriente.

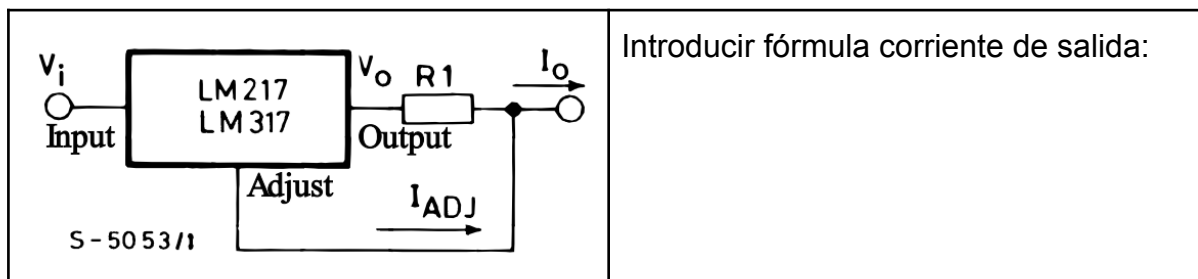


Figura 203 Extracto datasheet LM317 [52]

La fórmula para calcular la corriente de salida viene dada en la hoja de características. Para un montaje en el cuál se utiliza un LED de potencia con los siguientes datos obtenidos de su hoja de características, 350mA y 3,3V, calcular la resistencia necesaria.

¿Qué tipo de resistencia es necesaria para éste montaje en valor óhmico y de potencia? ¿Qué potencia disipa el driver y cuál es su potencia máxima?. Completar en la tabla

--	--

Table 1. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter		Value	Unit
$V_I - V_O$	Input-reference differential voltage		40	V
I_O	Output current		Internally limited	A
T_{OP}	Operating junction temperature for:	LM217	- 25 to 150	°C
		LM317	0 to 125	
		LM317B	-40 to 125	
P_D	Power dissipation		Internally limited	
T_{STG}	Storage temperature		- 65 to 150	°C

Figura 204 Extracto datasheet LM317 [52].

Table 2. Thermal data

Symbol	Parameter	D ^{PAK}	TO-220	TO-220FP	Unit
R_{thJA}	Thermal resistance junction-ambient	62.5	50	60	°C/W
R_{thJC}	Thermal resistance junction-case	3	5	5	°C/W

Figura 205 Extracto datasheet LM317 [52].

Antes de hacer ningún montaje, es necesario cerciorarse que los componentes utilizados están protegidos para no superar su condiciones máximas y que sufran daños, por eso, realizados los cálculos anteriores se sabe que hay que montar una resistencia de al menos 1/2W y un disipador para el componente.

Realizar el cálculo del disipador para que éste no supere los 50°C en el dispositivo, ¿Cuál sería el valor mínimo del disipador que aceptaría el dispositivo?

--	--

Buscar en la web un disipador que cumpla los requisitos mínimos y otro que cumpla los requisitos pedidos.

Insertar fotos de disipadores y características	Insertar fotos de disipadores y características
---	---

Sin embargo, para cumplir con los 50°C, es más complicado encontrar un disipador para este tipo de encapsulado, si se puede encontrar en mercado disipadores para TO-220 de hasta 30°C/W, el cual va atornillado al dispositivo para mejorar la superficie de contacto.

Insertar fotos de disipadores y características

Ya con todos los componentes preparados, es hora de profundizar en el montaje.

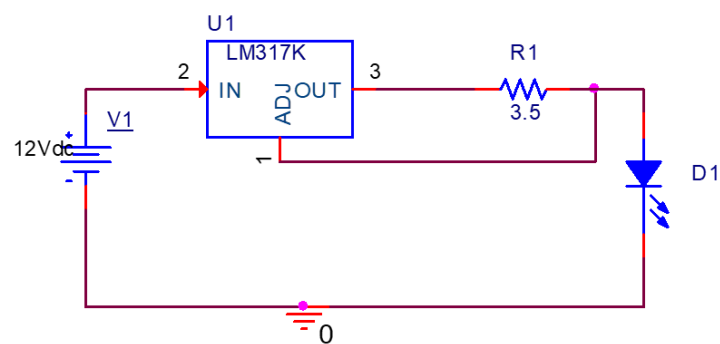


Figura 206. LM317 Esquematzado en Pspice.

Medir tensión que circula por el LED, corriente y tensión de alimentación, adquirir los datos de las tensiones de alimentación más significativas referidas a lo propuesto a analizar:

Tensión aliment. (V)	VLED (V)	IF MEDIDA (mA)

Insertar tabla corriente LED frente a la tensión de alimentación:

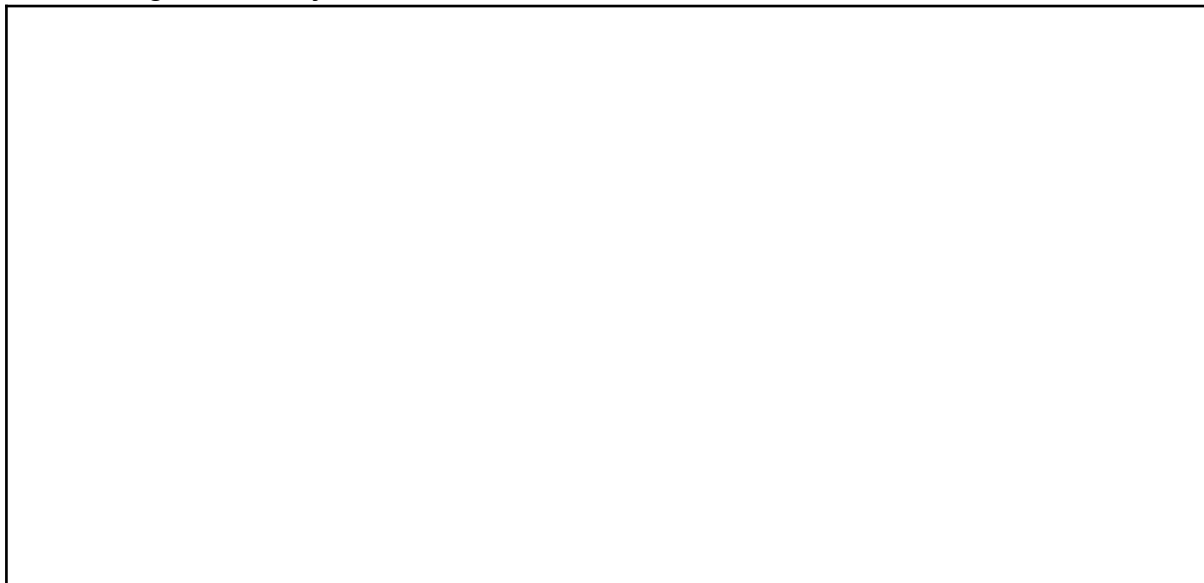
--

¿Qué pasaría si entre la resistencia y el ánodo del LED conectamos un transistor excitado con una señal pulsante?

Realizado dicho ensayo con los valores para un LED de 20mA, $R_1 = 62,5\Omega$, valor comercial $R_1 = 68\Omega$

Tensión aliment. (V)	PWM %	IF MEDIDA (mA)
12	0	
	20	
	30	
	40	
	50	
	60	
	70	
	80	
	100	

Introducir gráfica reflejando corriente frente señal PWM



Breve explicación de lo analizado:

5.2.2. LM317 REGULADOR DE Tensión

El siguiente circuito a destacar hace trabajar al driver como regulador de tensión, gracias a la tensión de ajuste del driver y un divisor de tensión, la tensión de salida es calculada.

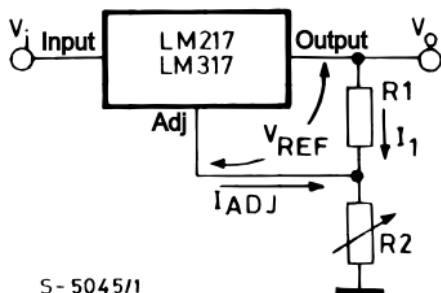


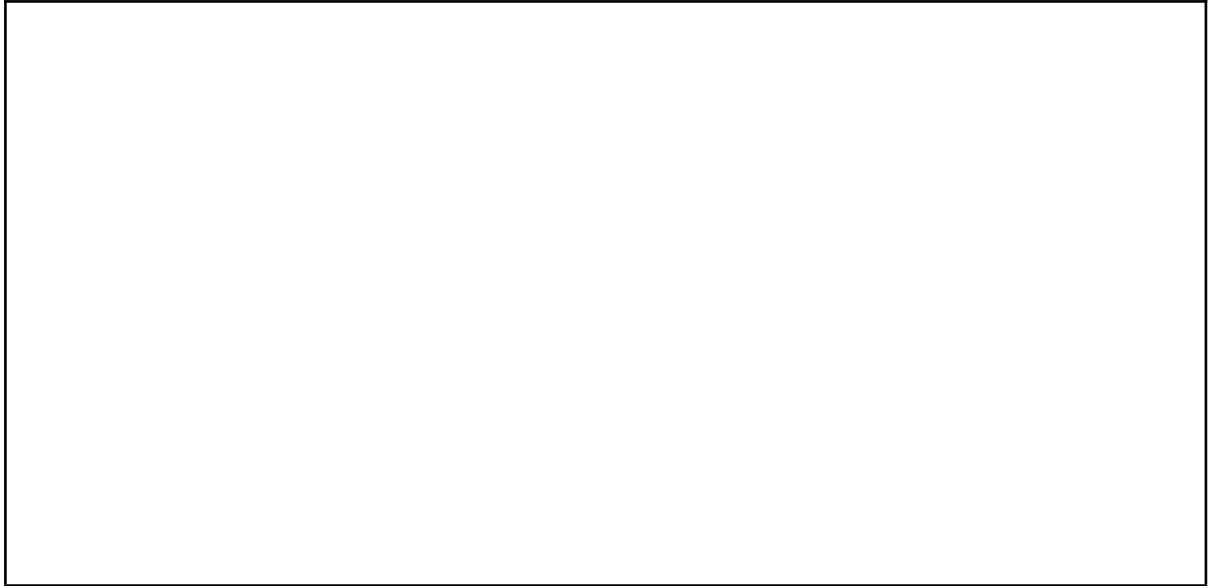
Figura 207 Extracto datasheet LM317 [52]

Realizar el cálculo del valor de las resistencias a aplicar según la tensión que quieras obtener a la salida

--	--	--	--

Tensión aliment. (V)	VLED (V)	Tensión aliment. (V)	VLED (V)
1		6	
1,5		6,5	
2		7	
2,5		7,5	
3		8	
3,5		8,5	
4		9	
4,5		9,5	
5		10	
5,5			

Introducir gráfica reflejando corriente frente señal PWM



¿Qué análisis obtienes de la gráfica? ¿Se asemeja a lo esperado?

5.3. LM78XX

El tercer y último driver a analizar en ésta práctica presenta al contrario de los demás, un solo encapsulado para las múltiples opciones de driver ha elegir según su encapsulado.

Product Number	Output Voltage Tolerance	Package	Operating Temperature	Packing Method
LM7805CT	±4%	TO-220 (Single Gauge)	-40°C to +125°C	Rail
LM7806CT				
LM7808CT				
LM7809CT				
LM7810CT				
LM7812CT				
LM7815CT				
LM7818CT				
LM7824CT				
LM7805ACT	±2%		0°C to +125°C	
LM7809ACT				
LM7810ACT				
LM7812ACT				
LM7815ACT				

Figura 208. Extracto datasheet LM78XX [56]

Características principales:

Corriente de salida superior a 1A.

Tensiones de salida: 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V

Según la terminación XX del driver que se elija tendrá una salida de tensión u otra.

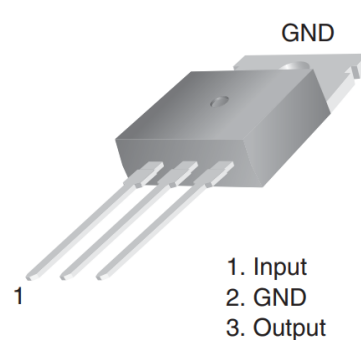


Figura 209. Extracto datasheet LM78XX, pineado [56]

Dentro del [DATASHEET](#) hay múltiples opciones de driver, tantas como tensiones de salida hay. Ésto hay que tenerlo en cuenta a la hora de realizar el análisis de las características del que esté en uso.

5.3.1. LM78XX REGULADOR DE Tensión

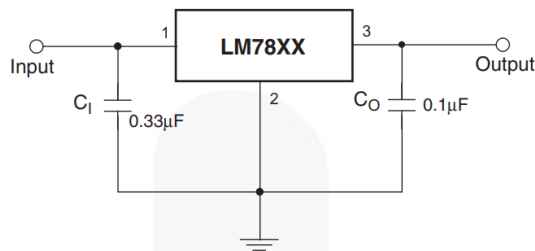


Figure 9. Fixed-Output Regulator

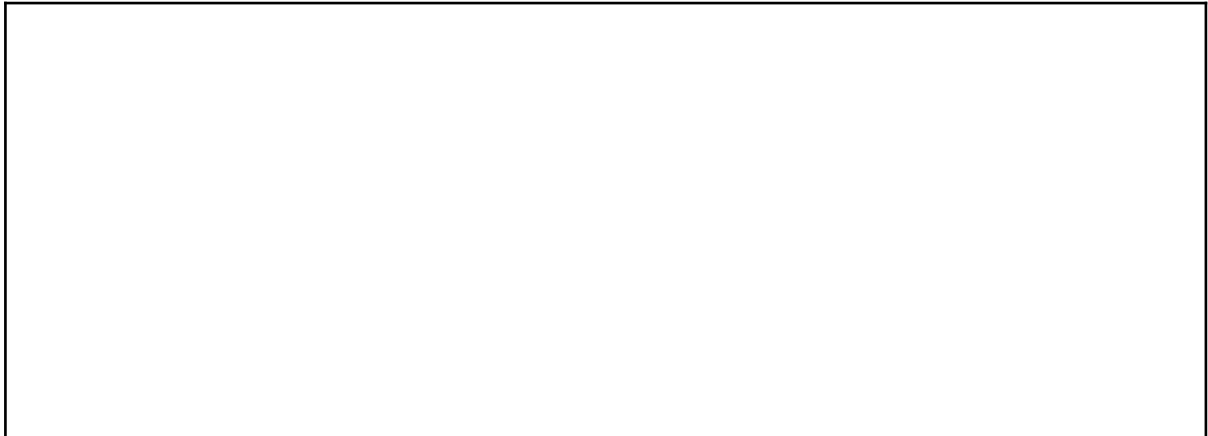
Figura 210. Extracto datasheet LM78XX, esquema [56]

El montaje que conlleva es más que sencillo, la tensión de salida será aquella que nos proporcione la patilla 3 (OUTPUT) y viene dado el valor por el valor de XX.

En el caso del que disponemos en el laboratorio es el driver LM7805.
¿A partir de qué valor el driver se volverá lineal? ¿Por qué?

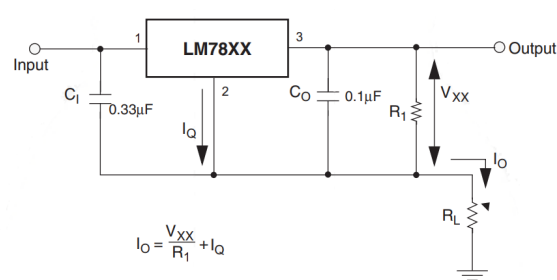
Tensión aliment. (V)	VLED (V)	Tensión aliment. (V)	VLED (V)

Ingresar una gráfica donde queden reflejados los datos obtenidos:



¿El valor a partir del que se convierte lineal se asemeja al que esperabas?

5.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE



Insertar foto montaje en laboratorio

Figure 10. Constant Current Regulator

Figura 211. Extracto datasheet [56]

La carga a poner en la salida será el LED de potencia que se ha manejado con anterioridad.

Realizar los cálculos para obtener una corriente de 100mA.

Tensión aliment. (V)	V_o (V)	IF MEDIDA (A)	Tensión aliment. (V)	V_o (V)	IF MEDIDA (A)

Introducir una gráfica con los datos obtenidos y el comportamiento V-I del LED



¿El comportamiento del driver fue el esperado?

6. SIMULACIONES

6.1. CL2N3

Debido a la dificultad de encontrar el modelo de este circuito integrado para poder trabajarlo en PSPICE, no es necesaria ninguna simulación

6.2. LM317

6.2.1. LM317 REGULADOR DE CORRIENTE

Realizar la simulación de dicho driver con la topología el encabezado y comparar resultados con los de la práctica

6.2.2. LM317 REGULADOR DE TENSIÓN

Realizar la simulación de dicho driver con la topología el encabezado y comparar resultados con los de la práctica

Realizar un barrido para analizar el comportamiento del driver en diferentes tensiones de alimentación.

¿Qué sucedería si, durante una tensión estable sufre el circuito un incremento de ésta? ¿Y si se redujera la tensión? Analízalo.

6.3. LM78XX

El último paso para terminar la práctica es simular el driver LM78XX en las dos topologías que se han ensayado en el laboratorio.

6.3.1. LM78XX REGULADOR DE TENSIÓN

Realizar la simulación de dicho driver con la topología el encabezado y comparar resultados con los de la práctica

Realizar un barrido para analizar el comportamiento del driver en diferentes tensiones de alimentación.

Si se realiza la misma pregunta que en la simulación con el driver LM317, ¿qué comportamiento se obtendría si la fuente de alimentación sufriera alteraciones en su tensión?

6.3.2. LM78XX REGULADOR DE CORRIENTE

Realizar la simulación de dicho driver con la topología el encabezado y comparar resultados con los de la práctica

Realizar un barrido para analizar el comportamiento del driver en diferentes tensiones de alimentación.

7. CONCLUSIONES

PRÁCTICA 4. C.I. CONVERTIDORES CONMUTADOS

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de los driver conmutados está basada en la inestabilidad de la alimentación del automóvil, es decir, la batería que es la fuente de energía de todos los sistemas electrónicos que manejan el coche tiene grandes variaciones en su tensión, ya sea debido a los cambios de temperatura, sobretensiones, arranques, ruido, etc ...

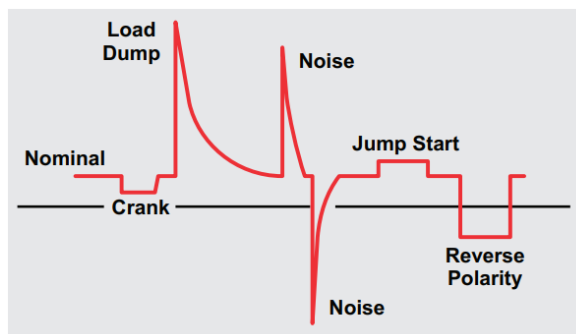


Figura 212. Picos tensión batería[58]

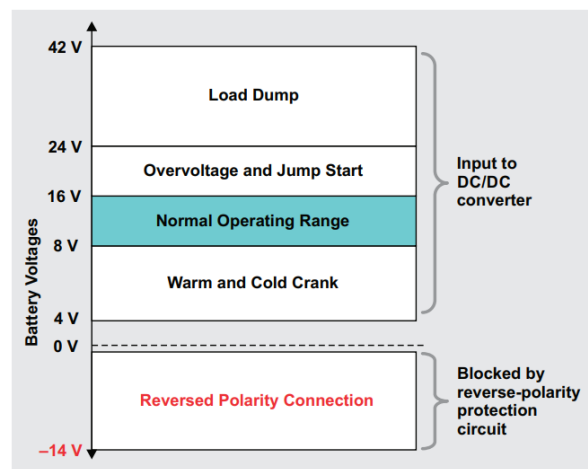


Figura 213. Rangos tensión batería [58]

Los convertidores para automoción tienen que ser capaces de manejar desde 3V hasta 42V cuando son alimentados por baterías de 12V. Para ello, los convertidores buck-boost (reductor - elevador) son los adecuados y en ésta práctica van a ser analizados por separado.

Además, es necesario proteger al convertidor de las tensiones negativas, a través de un circuito de protección de polaridad inversa.

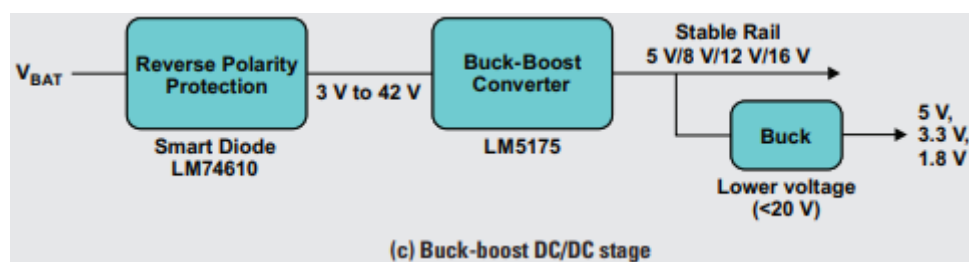


Figura 214. Esquema de bloques distribución electrónica en un automóvil

Éste es un ejemplo de la estructura para alimentar LEDs o algún otro driver.

2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- ☐ Analizar las características de los driver LM2596 y LM2585
- ☐ Calcular la eficiencia del circuito integrado LM2596
- ☐ Simular los circuitos integrados con el recursos del fabricante "WEBENCH"
- ☐ Contrastar los datos teóricos, experimentales y simulados con LM2596

3. DESCRIPCIÓN BÁSICA

Montar un circuito convertidor reductor en el laboratorio para realizar las medidas de tensión e intensidad tanto a la entrada de este, como a la salida, con objeto de calcular la eficiencia del mismo.

Posteriormente usando las herramientas que nos proporciona el fabricante, *Texas Instrument*, realizar la simulación del circuito reductor, para comparar los datos teóricos, experimentales y simulados.

Así pues, con *Webench* también, realizar el montaje de un circuito elevador para analizar sus corrientes en los periodos de conmutación del driver y estudiar su funcionamiento.

4. LISTADO DE MATERIAL

- ☐ Fuente de alimentación DC 30V 3A
- ☐ Multímetro precisión igual o mayor al 0,1%
- ☐ Osciloscopio cuyo ancho de banda sea al menos 250kHz
- ☐ LM2596
- ☐ Resistencias serie E12

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

5.1. CONVERTIDOR TIPO REDUCTOR

CONVERTIDOR TIPO BUCK



Figura 215. PCB Buck [12].

5.1.1. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER

Interpretar los datos obtenidos de la hoja de características del dispositivo y extraer los datos necesarios para el montaje experimental:

El driver es un regulador monolítico que proporciona todas las funciones de un reductor de tensión conmutado. Capaz de soportar hasta 3 A con una gran linealidad, preparado para aguantar una entrada máxima de 40 V y presenta una frecuencia de oscilación fijada en 150 kHz.

Los parámetros interesantes para el montaje experimental son obtenidos en el apartado 7.8 “Adjustable Voltage Version”, en el cuál se representan los valores teóricos de eficiencia del dispositivo a unas condiciones dadas. Calcular la eficiencia del circuito es uno de los objetivos de ésta práctica.

7.8 Electrical Characteristics – Adjustable Voltage Version

Specifications are for $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN ⁽¹⁾	TYP ⁽²⁾	MAX ⁽¹⁾	UNIT
SYSTEM PARAMETERS ⁽³⁾ (see Figure 9-13 for test circuit)					
V_{FB} Feedback voltage	$4.5\text{ V} \leq V_{IN} \leq 40\text{ V}$, $0.2\text{ A} \leq I_{LOAD} \leq 3\text{ A}$		1.23		V
	V_{OUT} programmed for 3 V (see Figure 9-13 for test circuit)	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.193	1.267	
		$-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$	1.18	1.28	
η Efficiency	$V_{IN} = 12\text{ V}$, $V_{OUT} = 3\text{ V}$, $I_{LOAD} = 3\text{ A}$		73%		

(1) All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are specified via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods. All limits are used to calculate Average Outgoing Quality Level (AOQL).

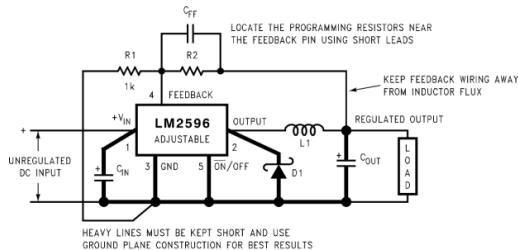
(2) Typical numbers are at 25°C and represent the most likely norm.

Figura 216. Extracto datasheet.

El regulador reductor necesita un diodo que proporcione un camino de vuelta a la corriente de la bobina cuando el conmutador está apagado. Requiere un diodo rápido que soporte la frecuencia de conmutación, el indicado es un diodo Schottky.

Para analizar su eficiencia y compararla con los datos proporcionados, hay que realizar los cálculos de resistencias de realimentación, condensadores e inductancia del circuito. Para ello se aprovecha la información que aporta la hoja de características en el apartado “9.2.2.1 Design Requirements”.

Obtener la fórmula para calcular R_2 , siendo $R_1=1k\Omega$



$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \rightarrow V_{REF} = 1.23V$$

$$R_2 = R_1 \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1\right) \rightarrow R_1 = 1k\Omega$$

Figura 217. Extracto datasheet [57]

Si la tensión de salida es mayor o igual a 10V, se necesita un condensador adicional para el circuito, su función es mejorar la ganancia de fase para mejorar la estabilidad.

$$C_{FF} = \frac{1}{31 \cdot 10^3 \times R_2}$$

Obtener el valor de la bobina, siendo $V_{IN} = 15V$ y $V_{OUT} = 10V$,

El valor de la bobina está tabulado por el fabricante, relacionando tensión y tiempo es posible obtener el valor con la tabla:

“ $E \cdot T \rightarrow$ Inductor Value Selection Guide”

$$E \times T = (V_{IN} - V_{OUT} - V_{SAT}) \left(\frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} - V_{SAT} + V_D} \right) \left(\frac{1000}{150 \text{ kHz}} \right)$$

Siendo:

$$V_{SAT} = 1.16V$$

$$V_D = 0.5V$$

$$E \times T \cong 20$$

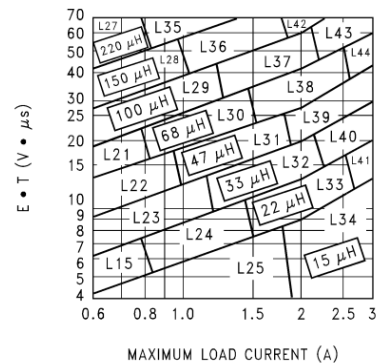


Figure 9-8. LM2596-ADJ

El valor de inductancia se obtendrá de la tabla, en función del parámetro obtenido y el valor de máxima corriente en la carga.

El condensador de entrada, electrolítico, es necesario entre los pines de entrada y masa. Previene los transitorios en la entrada y proporciona la corriente instantánea necesitada por el driver en cada conmutación de encendido.

El condensador de salida, electrolítico también, es necesario para filtrar la señal de salida y proporcionar estabilidad en el lazo de regulación.

5.1.2. CALCULAR LA EFICIENCIA DEL C.I.

Completar la siguiente tabla, con una tensión fija de entrada 15 V y haciendo un barrido en la tensión de salida, desde 1V hasta 10V con el módulo montado y comprado.

Introducir en el circuito una carga tal que su corriente de salida máxima sea de 1A. Medir los parámetros necesarios para calcular la eficiencia del circuito:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$$

Vin (V)	Vout (V)	Iin teor (A)	Iin exp (A)	Iout teor (A)	Iout exp (A)	Pteor (W)	Pin exp (W)	Pout exp (W)	η
15V	1	0,006	-	0,1	-	0,1	-	-	-
	2	0,027	0,043	0,2	0,18	0,4	0,65	0,36	55,81
	3	0,06	0,08	0,3	0,27	0,9	1,2	0,81	67,50
	4	0,107	0,133	0,4	0,378	1,6	2,00	1,512	75,79
	5	0,167	0,188	0,5	0,44	2,5	2,82	2,2	78,01
	6	0,24	0,267	0,6	0,54	3,6	4,01	3,22	80,45
	7	0,327	0,362	0,7	0,64	4,9	5,43	4,46	82,12
	8	0,427	0,474	0,8	0,74	6,4	7,11	5,92	83,26
	9	0,54	0,583	0,9	0,83	8,1	8,75	7,48	85,52
	10	0,667	0,729	1	0,93	10	10,94	9,26	84,68

Realizar un gráfico con los valores de la eficiencia

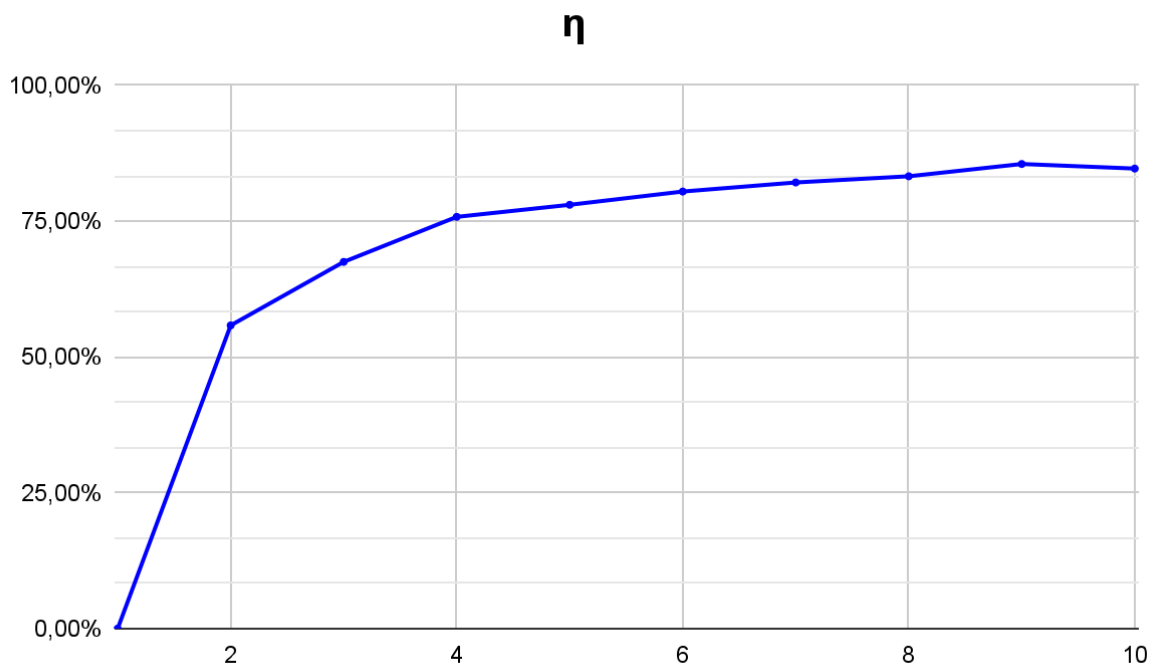


Figura 218. Eficiencia del CI

5.1.3. SIMULAR CON RECURSOS DEL FABRICANTE

Elegir el driver correspondiente en la web del fabricante:

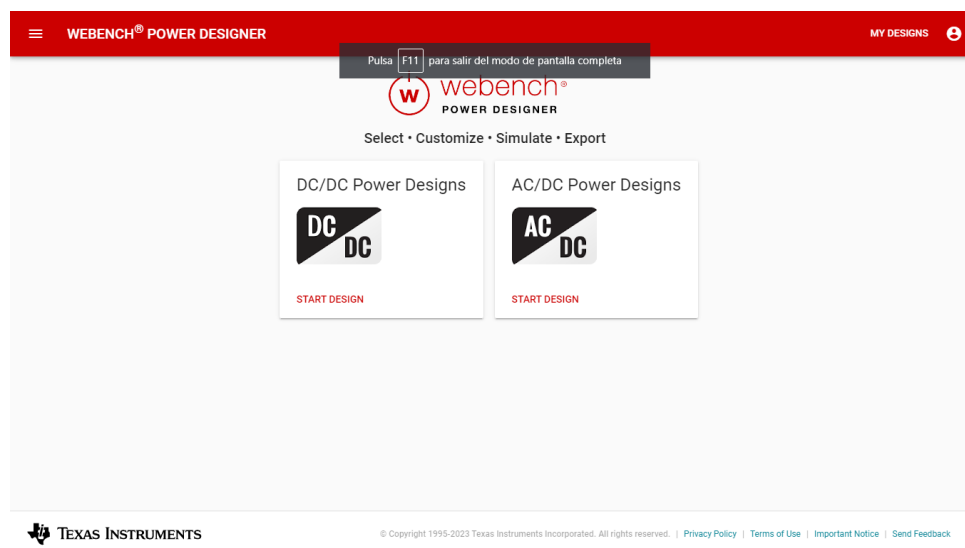


Figura 219. Inicio Webench [59]

WEBENCH® POWER DESIGNER

MY DESIGNS

Create a new DC/DC power design

WEBENCH® Power Designer creates customized power supply circuits based on your requirements. The environment gives you end-to-end power supply design capabilities that save you time during all phases of the design process. [Learn more](#)

Q lm2596

LM2596-12 (Buck)

LM2596-3.3 (Buck)

LM2596-5.0 (Buck)

LM2596-ADJ (Buck)

14 V 22 V

(50 - 500) (50 - 500)

Advanced

Advanced

Design Consideration

I want my design to be

Balanced Low Cost High Efficiency Small Footprint

Design Parameters

Figura 220. Selector Webench [59]

Parametrizar la configuración del driver:

WEBENCH® POWER DESIGNER

MY DESIGNS

power supply design capabilities that save you time during all phases of the design process. [Learn more](#)

Q LM2596

Great! We found **LM2596** and auto-filled the inputs for you

Input

Supply type is

DC AC

Vin Min * 15 V Vin Max * 15 V

(4.5 - 40) (4.5 - 40)

Advanced

Output

Vout * 10 V Iout Max * 1 A

(1.23 - 27) (0 - 3)

Isolated Output

Advanced

Design Consideration

I want my design to be

Balanced Low Cost High Efficiency Small Footprint

Design Parameters

VIEW DESIGN LM2596

Figura 221. Configurador de parámetros Webench[59]

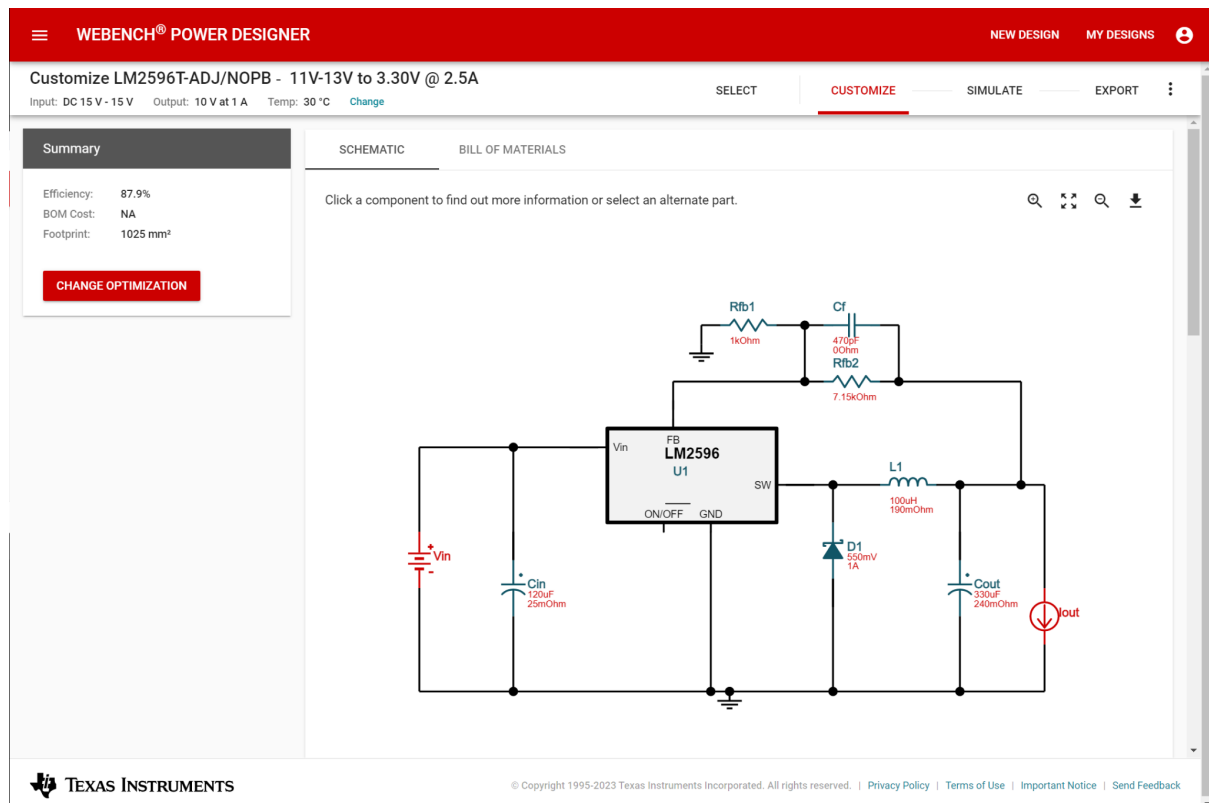
Revisar diseño:

Figura 222. Esquema devuelto por Webench [59]

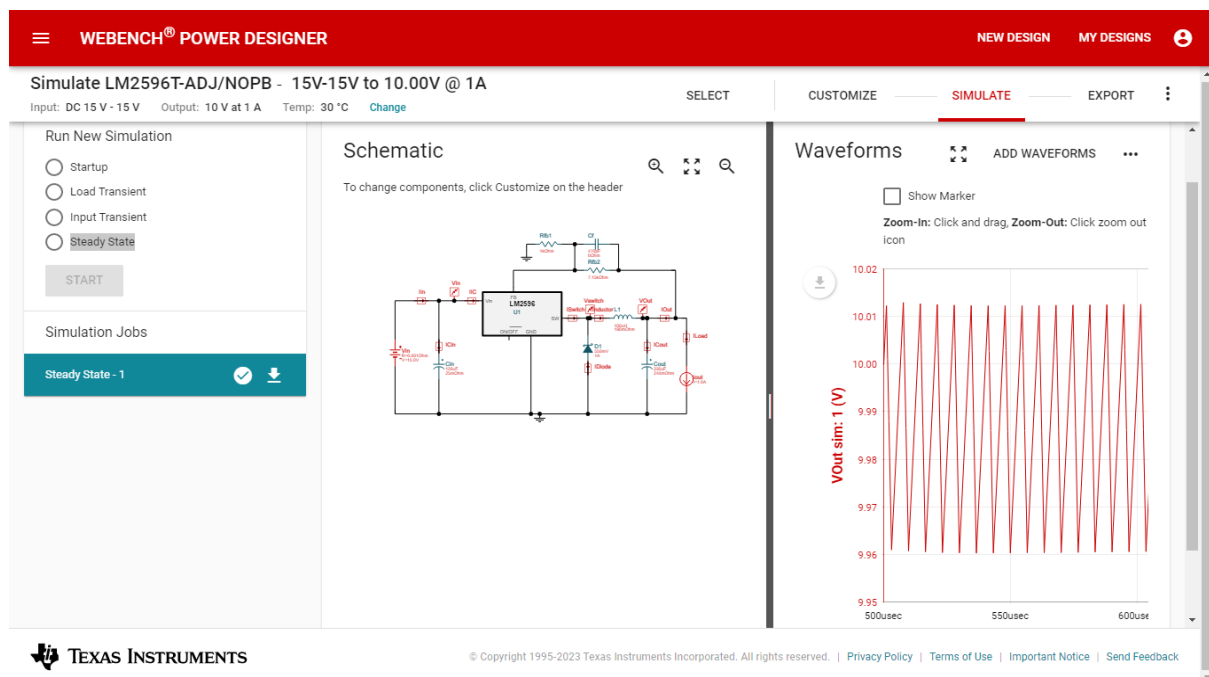
Simular en estado estabilizado:

Figura 223. Simulación Webench [59]

Graficar la corriente por el diodo frente a la tensión de salida:

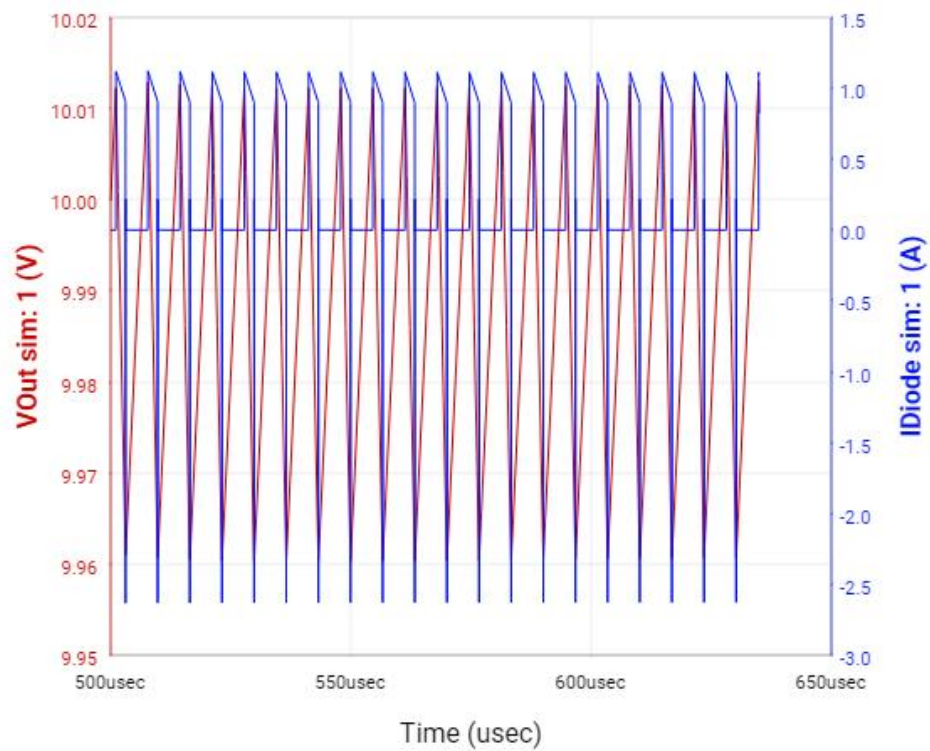


Figura 224. Onda tensión salida - corriente diodo Webench [59]

Graficar corriente en la bobina y en el diodo:

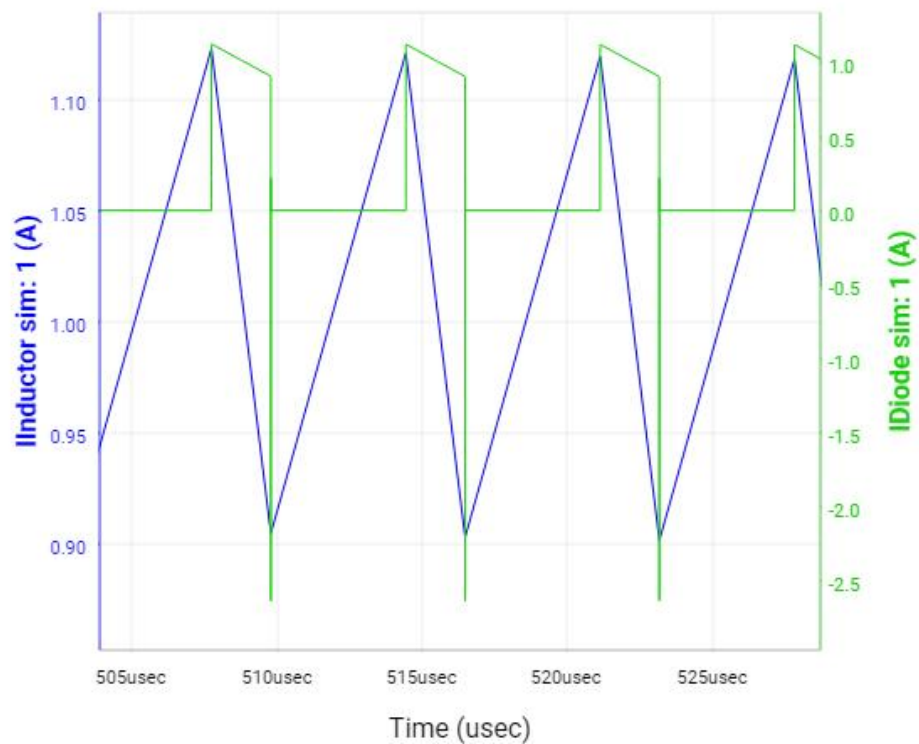


Figura 225. Onda corriente bobina y corriente diodo Webench [59]

Graficar las corrientes responsables de formar la corriente de salida:

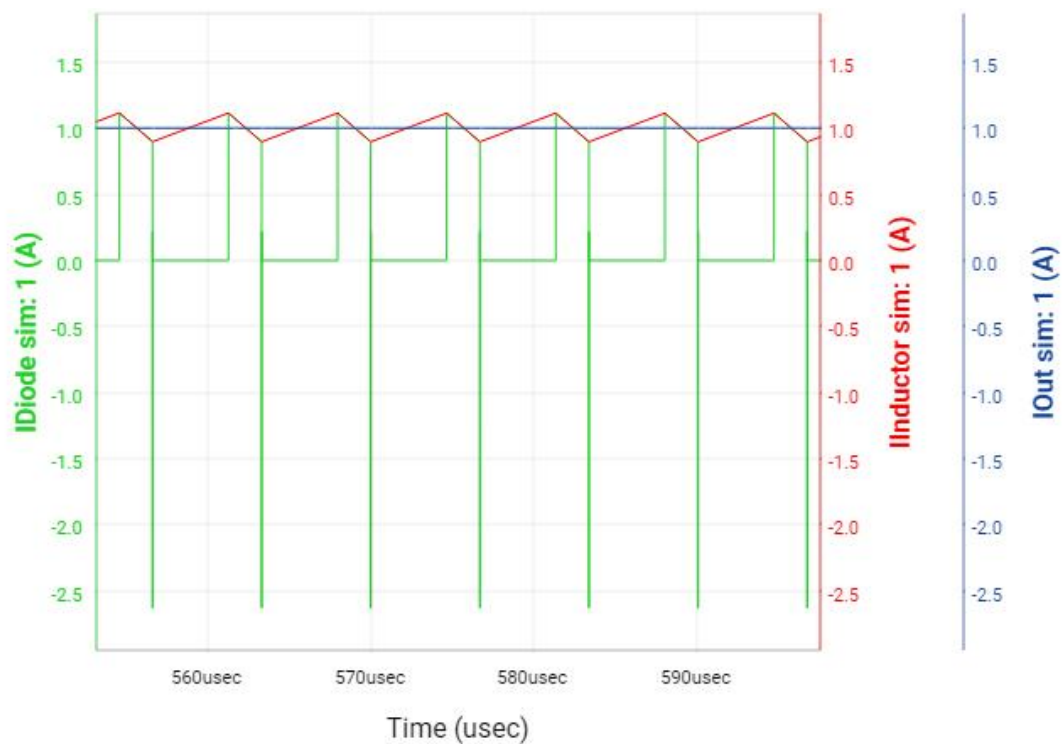


Figura 226. Onda corriente diodo, bobina y de salida en Webench [59]

5.2. CONVERTIDOR TIPO ELEVADOR

5.2.1. SELECCIONAR EL DRIVER

Introducir los parámetros de funcionamiento. El buscador seleccionará aquellos que son compatibles con nuestra definición.

WEBENCH® POWER DESIGNER MY DESIGNS

Create a new DC/DC power design

WEBENCH® Power Designer creates customized power supply circuits based on your requirements. The environment gives you end-to-end power supply design capabilities that save you time during all phases of the design process. [Learn more](#)

Part Number

Input

Supply type is: **DC** **AC**

Vin Min: 5 V (50-500) Vin Max: 5 V (50-500)

Output

Vout: 10 V (40-500) Iout Max: 0.5 A (0-100)

Isolated Output: ☐

Design Consideration

I want my design to be: **Balanced** Low Cost High Efficiency Small Footprint

Design Parameters

UPDATE DESIGNS

TEXAS INSTRUMENTS © Copyright 1995-2023 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved. | [Privacy Policy](#) | [Terms of Use](#) | [Important Notice](#) | [Send Feedback](#)

Figura 227. Selector Webench [59]

Elegir entre los propuestos:

WEBENCH® POWER DESIGNER NEW DESIGN MY DESIGNS

Select a Design

Input: DC 5 V - 5 V Output: 10 V at 0.5 A Temp: 30 °C [Change](#)

SELECT CUSTOMIZE SIMULATE EXPORT

79 matching designs out of 79 total designs

Filters: CLEAR FILTERS

Filter by Part Number

Regulator Type

☐ Module (Integrated Inductor)

☐ Converter (Integrated Switch)

☐ Controller (External Switch)

Design Attributes

Efficiency (%) 81-98

BOM Cost (\$) 0-13

Footprint (mm²) 89-181

Switching Frequency (kHz) 100-2177

Output Ripple (mV) 4-396

Compare	Part Number	Schematic Image	Iout(Max) (A)	Efficiency (%)	BOM Area (mm²)	BOM Cost (\$) (1ku)	BOM Count	Description	Customize
☐	LM2585-ADJ		3	84.1	666	5.38	9	4V to 40-V, 3-A step-up wide VIN flyback regulator	CUSTOMIZE
☐	LM2586-ADJ		3	84.1	666	5.21	9	4V to 40-V, 3-A step-up wide VIN flyback regulator with frequency synchronization	CUSTOMIZE
☐	LM2587-ADJ		5	84.7	681	7.15	9	4V to 40V, 5A Step-Up Wide Vin Flyback Regulator	CUSTOMIZE
☐	LM2588-ADJ		5	84.7	681	6.64	9	4V to 40-V, 5-A step-up wide VIN flyback regulator with frequency synchronization	CUSTOMIZE
☐	LM2621		2.85	88.8	305	2.34	13	1.2V to 14V input voltage, 1A load current, step-up DC-DC	CUSTOMIZE

TEXAS INSTRUMENTS © Copyright 1995-2023 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved. | [Privacy Policy](#) | [Terms of Use](#) | [Important Notice](#) | [Send Feedback](#)

Figura 228. Selector circuito Webench [59]

Entre todos los circuitos propuestos por el simulador que cumplen las condiciones interpuestas, elegir el driver LM2585 pues pertenece a la misma familia que el driver LM2596.

5.2.2. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER

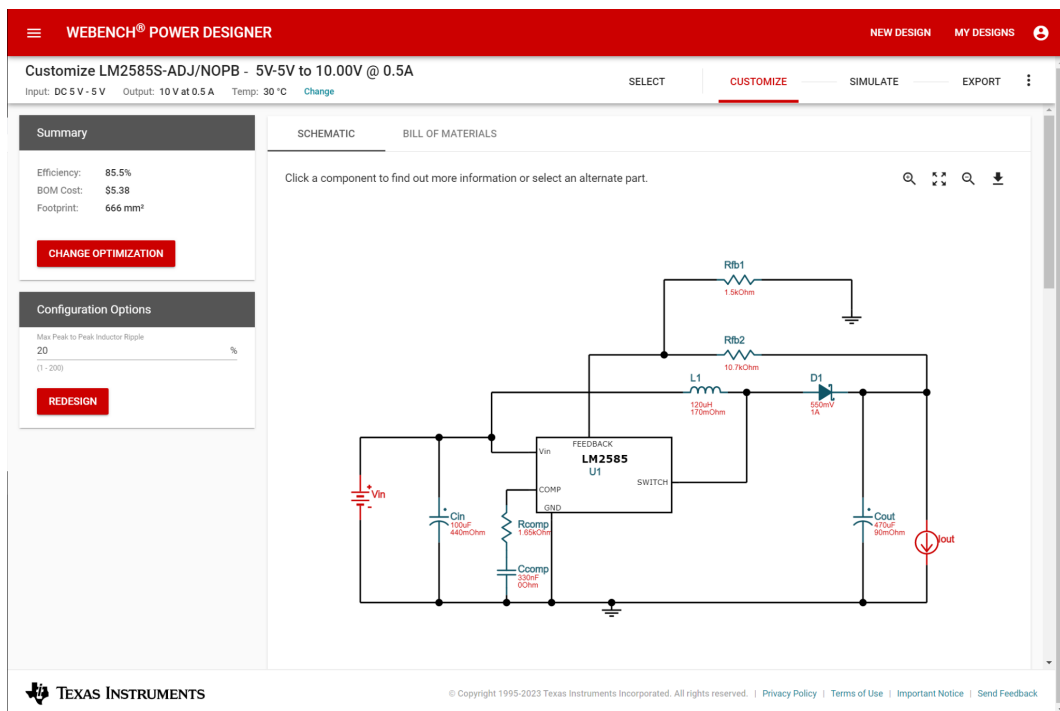


Figura 229. Esquemático del circuito Webench [59]

El funcionamiento del regulador elevador es el siguiente:

Cuando el transistor está polarizado en saturación, la corriente por la bobina crece con una relación del tipo $\frac{V_{IN}}{L}$, almacenando energía en la misma. Por el contrario, transistor se encuentra en corte, hay una diferencia de potencial en la bobina que produce que la corriente sea conducida a través del diodo hacia el condensador de salida con una relación de $\frac{V_{OUT} - V_{IN}}{L}$. La energía almacenada en la bobina es transferida a la salida durante el periodo de corte del transistor. La tensión de salida es controlada con el ajuste del pico de corriente de conmutación.

Comprobar el funcionamiento con la simulación del circuito.

Simular en estado estabilizado, obtener la señal de salida:

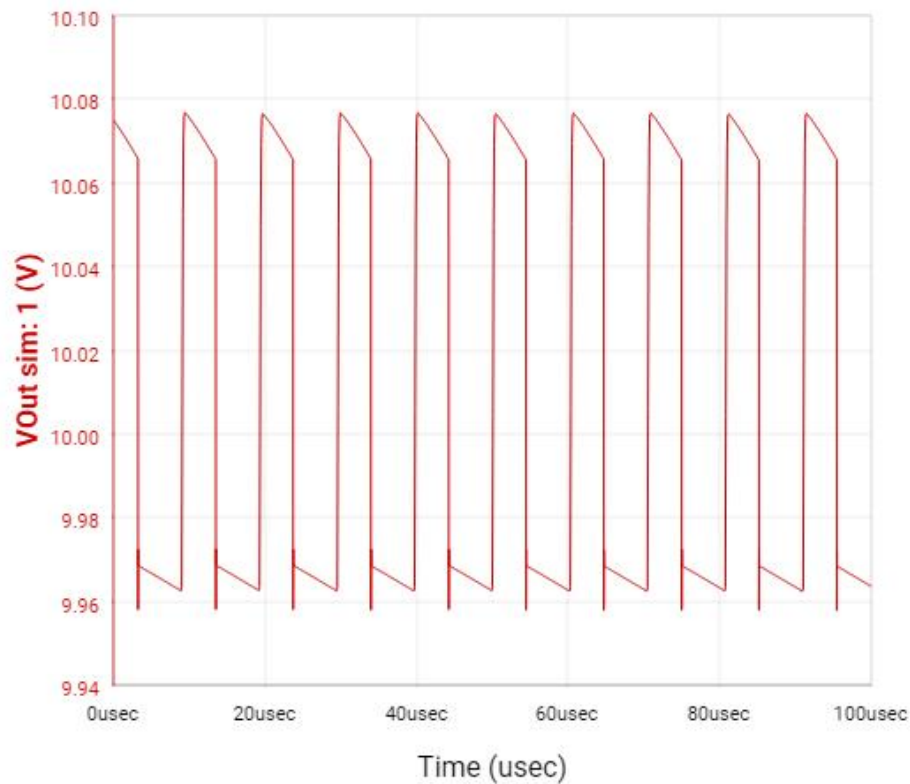


Figura 230. Señal tensión de salida en Webench [59]

Representar la tensión de conmutación, tensión de salida y corriente por la bobina:

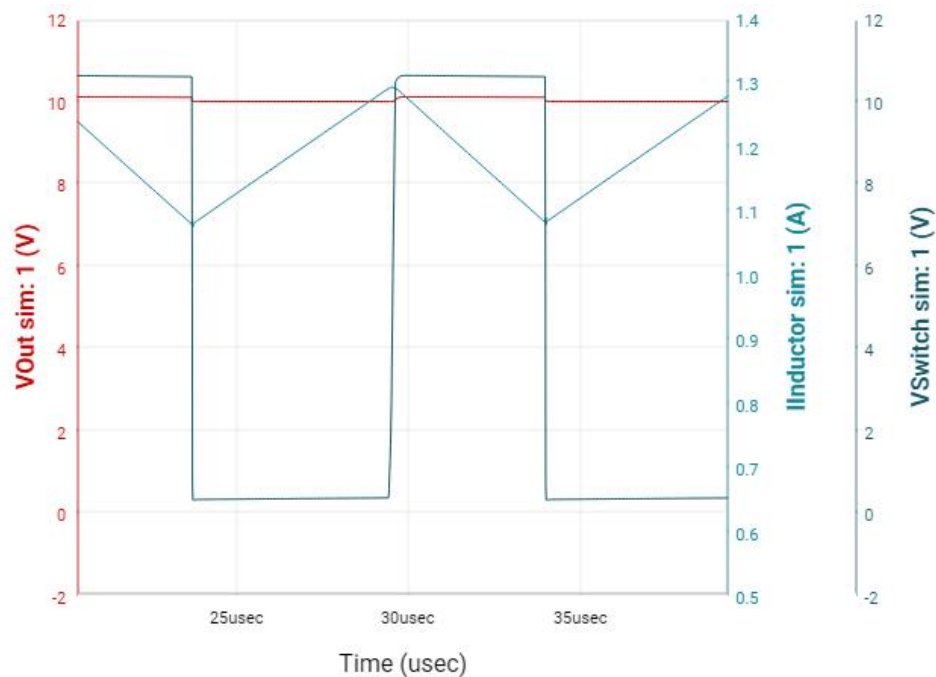


Figura 231. Tensión de salida, de conmutación y corriente en la bobina en Webench [59].

Representar las corrientes que circulan a través de los elementos pasivos implicados en la señal de salida y como señal de referencia, la tensión de conmutación.

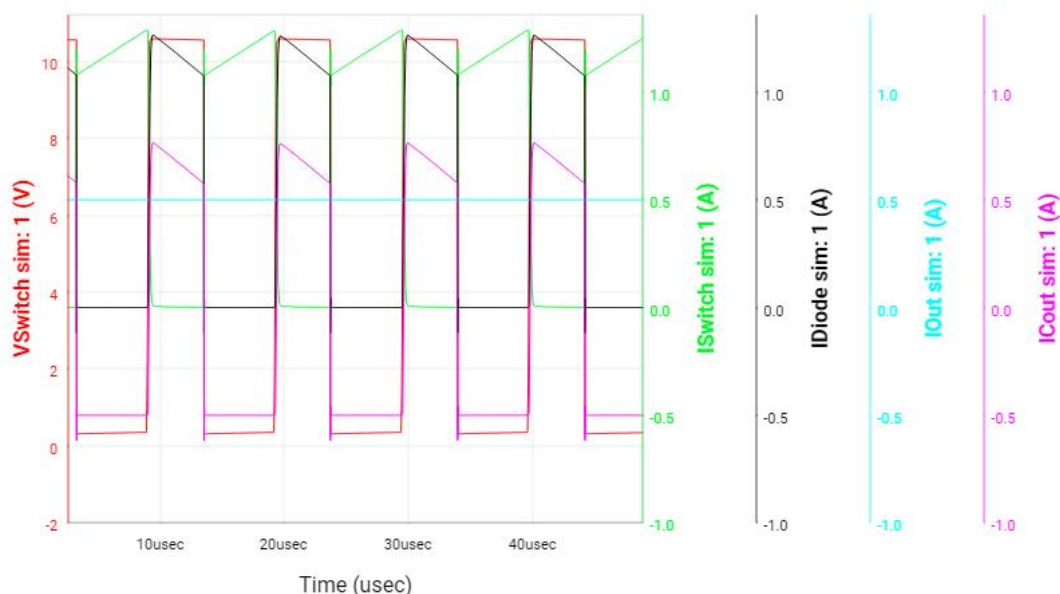


Figura 232. Tensión de conmutación y todas las corrientes de los elementos pasivos en Webench [59].

6. CONCLUSIONES

Tras completar todos los apartados de la práctica, es necesario reflexionar sobre los datos calculados, medidos y simulados.

Los cálculos, facilitados por el fabricante en el datasheet de cada dispositivo, devuelve unos datos que han podido ser comprobados con los valores proporcionados por *WEBENCH*, el simulador de *Texas Instrument*, en el laboratorio no se disponía de acceso físico para medir la inductancia.

Todas las corrientes y señales simuladas han servido para comprobar el funcionamiento de cada uno de los driver, ya sea reductor o elevador, se ha intentado reflejar un par de periodos donde se visualizaba los dos puntos de trabajo del transistor, corte y saturación, y el comportamiento de la corriente según se ha explicado su funcionamiento en sus apartados y en la teoría.

Físicamente dichas señales tienen un proceso complicado de medida, pues las placas comerciales no permiten el acceso a los pads de los componentes, además de no tener puntos de control como sí tienen las placas de automoción, para poder ser chequeadas durante el proceso de ensamblaje en más máquinas pick & place,

además de los múltiples ensayos a los que son sometidas para la validación electrónica que estipula cada fabricante.

Hablando de la eficiencia del circuito, calculado con los valores tomados en el laboratorio, el fabricante ofrece una orientación para unas determinadas condiciones, como son:

- 12V tensión de entrada
- 3V tensión de salida
- 3A corriente de salida

Proporciona una eficiencia máxima del 73%

Para las condiciones del laboratorio y simuladas, las medidas experimentales devuelven una eficiencia del 84,68% frente al 87,9% devuelto por el simulador.

Considerando las pérdidas derivadas de la tolerancia de los equipos de medidas, los valores simulados y experimentales son bastante próximos, por lo que podemos considerar que nuestros ensayos experimentales y la simulación del driver son idénticos. Se ha realizado un correcto ensayo experimental.

PRÁCTICA 4. C.I. CONVERTIDORES CONMUTADOS

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de los driver conmutados está basada en la inestabilidad de la alimentación del automóvil, es decir, la batería que es la fuente de energía de todos los sistemas electrónicos que manejan el coche tiene grandes variaciones en su tensión, ya sea debido a los cambios de temperatura, sobretensiones, arranques, ruido, etc ...

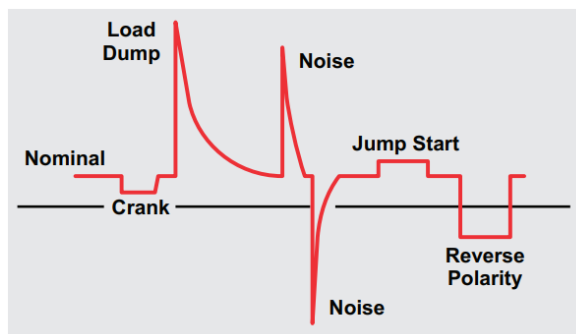


Figura 233. Picos tensión batería[58]

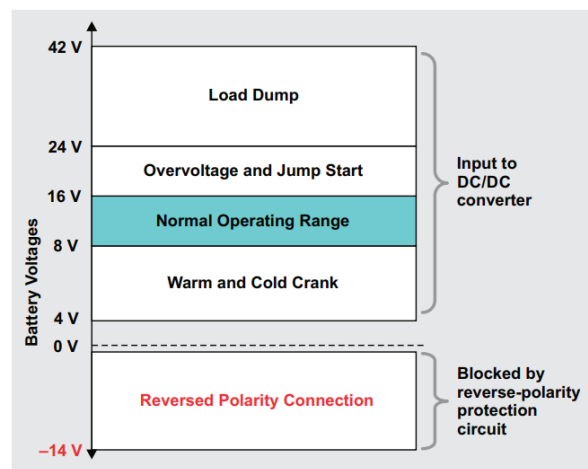


Figura 234. Rangos tensión batería [58]

Los convertidores para automoción tienen que ser capaces de manejar desde 3V hasta 42V cuando son alimentados por baterías de 12V. Para ello, los convertidores buck-boost (reductor - elevador) son los adecuados y en ésta práctica van a ser analizados por separado.

Además, es necesario proteger al convertidor de las tensiones negativas, a través de un circuito de protección de polaridad inversa.

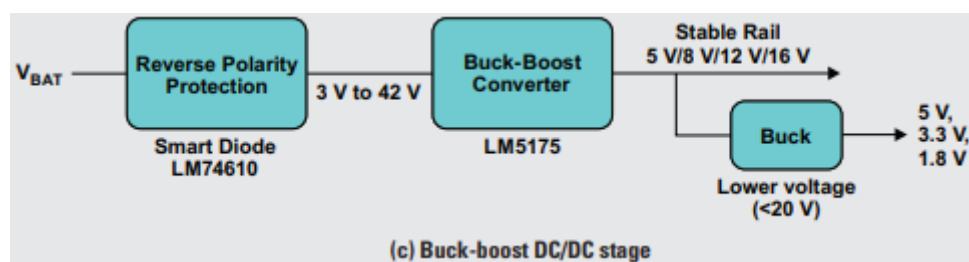


Figura 235. Esquema de bloques distribución electrónica en un automóvil

Éste es un ejemplo de la estructura para alimentar LEDs o algún otro driver.

2. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- ☐ Analizar las características de los driver LM2596 y LM2585
- ☐ Calcular la eficiencia del circuito integrado LM2596
- ☐ Simular los circuitos integrados con el recursos del fabricante “WEBENCH”
- ☐ Contrastar los datos teóricos, experimentales y simulados con LM2596

3. DESCRIPCIÓN BÁSICA

Montar un circuito convertidor reductor en el laboratorio para realizar las medidas de tensión e intensidad tanto a la entrada de este, como a la salida, con objeto de calcular la eficiencia del mismo.

Posteriormente usando las herramientas que nos proporciona el fabricante, *Texas Instrument*, realizar la simulación del circuito reductor, para comparar los datos teóricos, experimentales y simulados.

Así pues, con *Webench* también, realizar el montaje de un circuito elevador para analizar sus corrientes en los periodos de conmutación del driver y estudiar su funcionamiento.

4. LISTADO DE MATERIAL

- ☐ Fuente de alimentación DC 30V 3A
- ☐ Multímetro precisión igual o mayor al 0,1%
- ☐ Osciloscopio cuyo ancho de banda sea al menos 250kHz
- ☐ LM2596
- ☐ Resistencias serie E12

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

5.1. CONVERTIDOR TIPO REDUCTOR

CONVERTIDOR
TIPO BUCK



Figura 236. PCB Buck [12].

5.1.1. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER

Buscar e interpretar los datos obtenidos de la hoja de características del dispositivo y extraer los datos necesarios para el montaje experimental:

Rellenar con la información considerada importante del dispositivo

Para analizar la eficiencia y compararla con los datos proporcionados, hay que realizar los cálculos de resistencias de realimentación, condensadores e inductancia del circuito.

Obtener la fórmula para calcular R_2 , siendo $R_1 = 1k\Omega$

Completar con los cálculos necesarios:

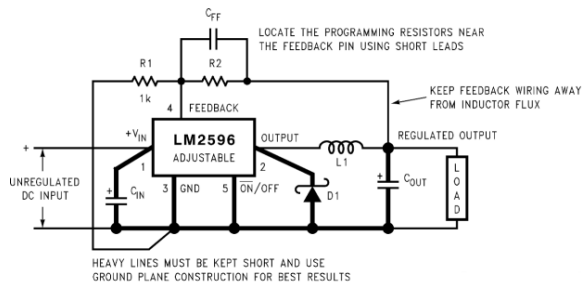


Figura 237. Extracto datasheet [57]

Obtener el valor de la bobina, siendo $V_{IN} = 15V$ y $V_{OUT} = 10V$,

Completar con los cálculos necesarios:

5.1.2. CALCULAR LA EFICIENCIA DEL C.I.

Completar la siguiente tabla, con una tensión fija de entrada 15 V y haciendo un barrido en la tensión de salida, desde 1V hasta 10V.

Introducir en el circuito una carga tal que su corriente de salida máxima sea de 1A.
Medir los parámetros necesarios para calcular la eficiencia del circuito:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$$

V _{in} (V)	V _{out} (V)	I _{in} teor (A)	I _{in} exp (A)	I _{out} teor (A)	I _{out} exp (A)	P _{teor} (W)	P _{in} exp (W)	P _{out} exp (W)	η
15V	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								
	9								
	10								

Realizar un gráfico con los valores de la eficiencia

Introducir una gráfica con los datos de la eficiencia:

5.1.3. SIMULAR CON RECURSOS DEL FABRICANTE

Elegir el driver correspondiente en la web del fabricante:

Realizar las simulaciones de los siguientes driver LM2596-ADJ en Webench para aprender a usar los recursos proporcionados por el fabricante:

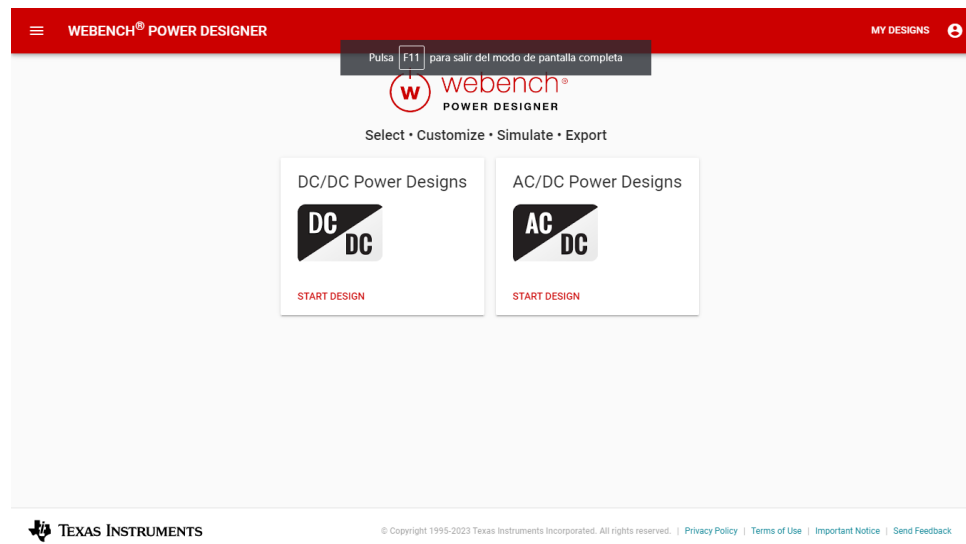


Figura 238. Inicio Webench [59]

Parametrizar la configuración del driver: (Insertar imagen)

Revisar diseño: (Insertar imagen)

Simular en estado estabilizado: (Insertar imagen)

Graficar la corriente por el diodo frente a la tensión de salida: (Insertar imagen)

Graficar corriente en la bobina y en el diodo: (Insertar imagen)

Graficar las corrientes responsables de formar la corriente de salida: (Insertar imagen)

5.2. CONVERTIDOR TIPO ELEVADOR

5.2.1. SELECCIONAR EL DRIVER

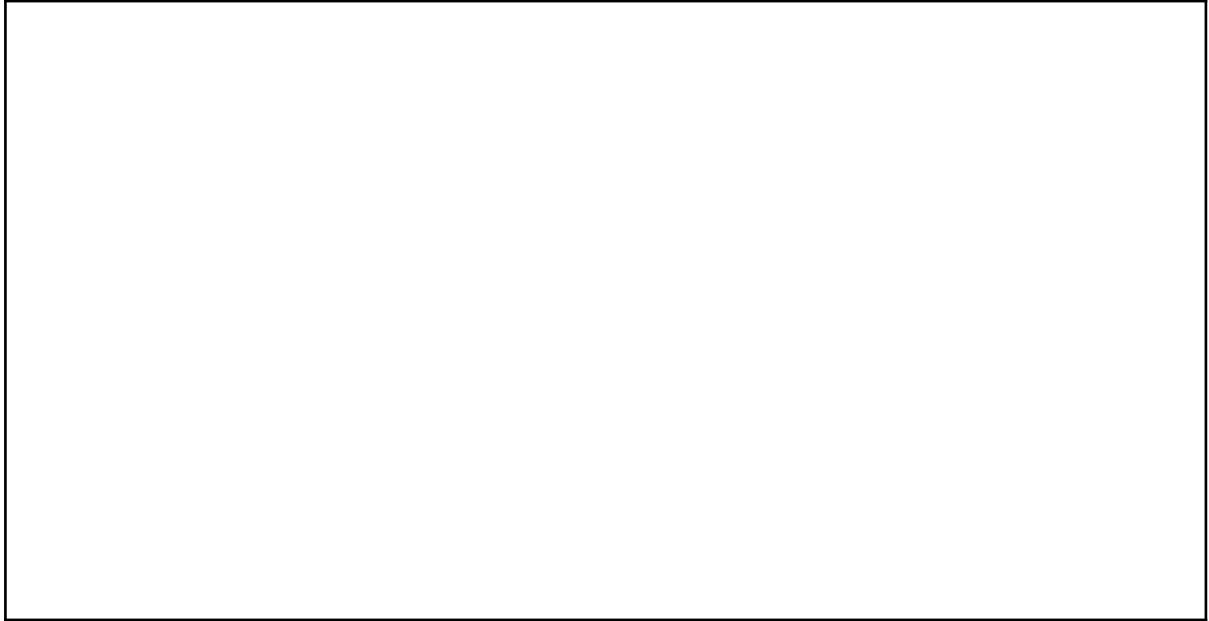
Introducir los parámetros de funcionamiento. El buscador seleccionará aquellos que son compatibles con nuestra definición. 5V de entrada y 10V 0.5A de salida.

The screenshot shows the WEBENCH® POWER DESIGNER web application. The header is red with the logo and 'MY DESIGNS' link. The main content area is titled 'Create a new DC/DC power design'. Below this, there's a search bar for 'Part Number'. The 'Input' section has 'Supply type is' set to 'DC', with 'Vin Min' at 5V and 'Vin Max' at 5V. The 'Output' section has 'Vout' at 10V and 'Iout Max' at 0.5A. There's an 'Isolated Output' toggle. Below these are 'Design Consideration' options: 'Balanced', 'Low Cost', 'High Efficiency', and 'Small Footprint'. A 'Design Parameters' dropdown and an 'UPDATE DESIGNS' button are at the bottom. The footer includes the Texas Instruments logo and copyright information.

Figura 239. Selector Webench [59]

Elegir entre los propuestos: (Insertar imagen)

Explicar la elección:

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to provide an explanation for their choice.

5.2.2. ANALIZAR FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER

Comprobar el funcionamiento con la simulación del circuito.

Simular en estado estabilizado, obtener la señal de salida: (Insertar imagen)

*Representar la tensión de conmutación, tensión de salida y corriente por la bobina:
(Insertar imagen)*

Representar las corrientes que circulan a través de los elementos pasivos implicados en la señal de salida y como señal de referencia, la tensión de conmutación. (Insertar imagen)

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Valeo Service. (2016, January 1). New Valeoscope: lighting systems range.
<https://th.valeoservice.com/en-th/newsroom/new-valeoscope-handbook-covers-entire-lighting-systems-range>
- [2] OLED Audi A8.
https://oledlight.org/wp-content/uploads/2021/12/A218132_medium-scaled-1-scaled-2.jpg
- [3] Imagen sustrato OLED Wikipedia.
https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Estructura_es_OLED.jpg
- [4] Imagen OLED flexible.
<https://www.lawebdelgadget.es/pantalla-oled-flexible-grafeno/>
- [5] Marcos, A. (-, - -). Archivo:LED Fundamento Fisico.jpg. Wikipedia.
https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:LED_Fundamento_Fisico.jpg
- [6] Curva V-I LED por colores. Wiktionary.
<https://i0.wp.com/blog.330ohms.com/wp-content/uploads/2021/08/IV-curves-all-colours.png?w=564&ssl=1>
- [7] Curva espectro de color. Wiktionary.
http://www.jpereira.net/cache/multithumb_thumbs/b.200.200.16777215.0...images.stories.luz-led.SPD-maxima-potencia.png
- [8] Disipador Refrigeración Forzada. Farnell.
<https://es.farnell.com/fischer-elektronik/la-led-68-100-sa/disipador-con-vent-157l-min-100mm/dp/2502190>
- [9] Faros Ford T
<https://www.alamy.es/radiador-y-faros-de-un-ford-modelo-t-de-1911-image6039888.html>
- [10] Faro Philips halógeno con cristal estriado
<http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRHf57rXoJ3cFqKrzP3PTm1TiW8-PCe3Bj1mBTmSex4jgAZnNQN>
- [11] Estructura bombilla Xenon
<https://edisontechcenter.org/metalhalide.html>
- [12] “Curso Experto Optoelectrónica aplicada a la iluminación del automóvil” Universidad de Jaén. Manual de prácticas. Acceso restringido.
- [13] Extérieur > Audi Q4 e-tron > Q4 e-tron. Audi.
<https://www.audi.fr/fr/web/fr/gamme/q4-e-tron/audi-q4-e-tron/exterieur.html>
- [14] Guía de Luz de faro delantero inyectada en PMMA - Serie. ProtoSpain.
<https://protospain.com/project/guia-de-luz/>
- [15] Faro Izquierdo Delantero Xenon Volvo XC60 89038337 89017285. Eurofrance.
https://eurofrance.es/catalog/product/view/_ignore_category/1/id/136200/s/faro-izquierdo-delantero-xenon-volvo-xc60-89038337-89017285/
- [16] BMW Laserlight: ¿faros de láser más caros que un Ibiza! Autobild.
<https://www.autobild.es/noticias/bmw-laserlight-precios-espana-242991>
- [17] Curva isolux LED

<https://www.autoled4x4.com/es/faro-led-60w-leds-osram-homologado-largo-alcance-hr-30.html>

[18] Tipos de LED más utilizados - FH SOLAR LED IBÉRICA. fh solar led.

<https://fhsolarled.com/tipos-de-led-mas-utilizados/>

[19] De Horst Frank, Jailbird.

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1793461>

[20] Signal lights - Switching signature tail lights. Volkswagen Newsroom.

<https://www.volkswagen-newsroom.com/en/evolution-of-light-4261/signal-lights-switching-signature-tail-light-4271>

[21] Hart, D. W. (2001). *Electrónica de potencia*. Pearson Educación.

[22] *Modelado y diseño de compensación de lazo en fuentes de alimentación conmutadas - PDF Free Download*. DocPlayer.

<https://docplayer.es/77632666-Modelado-y-diseno-de-compensacion-de-lazo-en-fuentes-de-alimentacion-conmutadas.html>

[23] *Automotive Solutions for Body and Convenience*. STMicroelectronics.

https://www.st.com/resource/en/brochure/st12623_brautobc0818_ep_web.pdf

[24] Datasheet STEVAL-ILL089V1. Mouser.

https://www.mouser.es/datasheet/2/389/steval_ill089v1-2307040.pdf

[25] NXP Multi-Channel LED Drivers ASLx50y & ASLx41y Series. NXP.

https://www.nxp.com/docs/en/product-selector-guide/MC_71502-SG.pdf

[26] DESIGN SOLUTIONS AUTOMOTIVE “Time for a New Class of Flexible Automotive LED Drivers”. Analog Devices.

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/time-for-a-new-class-of-flexible-automotive-led-drivers.pdf>

[27] Automotive LED Driver Power Conversion Topology Guide. Analog Devices.

<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-56/number-3/automotive-led-driver-power-conversion-topology-guide.pdf>

[28] Fundamentals to automotive LED driver circuits. Texas Instruments.

https://www.ti.com/lit/wp/slyy163/slyy163.pdf?ts=1667813451006&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FTIDA-020009

[29] An ECU Architecture for Adaptive Headlights. Texas Instruments.

https://www.ti.com/lit/wp/slyy170/slyy170.pdf?ts=1681323511338&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS92662-Q1

[30] Automotive Front Headlight Selection Guide. Texas Instruments.

https://www.ti.com/lit/an/sluaad5/sluaad5.pdf?ts=1681327875195&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS92662A-Q1

[31] Designing the front-end DC/DC conversion stage to withstand automotive transients. Texas Instruments.

https://www.ti.com/lit/an/slyt707/slyt707.pdf?ts=1682173689401&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsolution%252Fautomotive-interior-light%253Fkey%253DDCDC%2BCONVERTER%2BFOR%2BBLIGHTING

[32] Trends and topologies for automotive rear lighting systems. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/lit/wp/szzy011a/szzy011a.pdf?ts=1682149693400>

[33] TPS92665-Q1. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/product/TPS92665-Q1?keyMatch=TPS92665-Q1&tisearch=search-everything&usecase=GPN-ALT>

[34] TPS92667-Q1. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/product/TPS92667-Q1?keyMatch=TPS92667-Q1&tisearch=search-everything&usecase=GPN-ALT#design-development>

[35] TPS92667EVM. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/tool/TPS92667EVM-243>

[36] *EOS/ESD Fundamentals* | EOS. ESD Association.

<https://www.esda.org/esd-overview/esd-fundamentals/>

[37] EMC - system immunity against electrostatic discharges. STMicroelectronics.

https://www.st.com/resource/en/product_presentation/basics_how_to_protect_applications_against_esd_2021.pdf

[38] Automotive LED Driver Technology. Analog Devices.

<https://www.analog.com/en/applications/markets/automotive-pavilion-home/automotive-led-driver.html>

[39] *Noise Suppression (EMI/EMC Suppression) for Automotive Devices* | *Outline of EMI Suppression Filters (EMC and Noise Suppression)*. Murata.

<https://www.murata.com/en-eu/products/emc/emifil/overview/auto>

[40] EMI filter components and their non idealities for automotive DC/DC regulators. Texas Instruments.

https://www.ti.com/lit/an/slyt782/slyt782.pdf?ts=1681275175432&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[41] *EMI Produced From Switching FETs and Diodes*. PCB Design & Analysis.

<https://resources.pcb.cadence.com/blog/emi-produced-from-switching-fets-and-diodes>

[42] *LED driver basics* | *TI.com*. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/video/series/led-driver-basics.html#>

[43] Texas Instruments. (n.d.). *How to design input EMI filters for an automotive DC/DC converter* | *Video* | *TI.com*. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/video/5083940147001>

[44] *Automotive EMI filters, ECMF and ASIP*. STMicroelectronics.

<https://www.st.com/en/protections-and-emi-filters/automotive-emi-filters-ecmf-and-asip.html#>

[45] Layout Tips for Radiated EMI Reduction in Your Designs

<https://youtu.be/HT3v71NoiKw>

[46] Datasheet LED blanco. RS Component.

<https://docs.rs-online.com/32ec/0900766b808c1f0b.pdf>

[47] Datasheet LED azul. Digi Key.

<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Osram%20PDFs/LB,LV,LT%20543C.pdf>

[48] Datasheet LED rojo. Digi Key.

<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Osram%20PDFs/LW541C.pdf>

[49] Datasheet LED naranja. RS Component.

<https://docs.rs-online.com/40ab/0900766b808b6aa9.pdf>

[50] Datasheet Q2N2222. Ok Datasheet

<https://www.okdatasheet.cn/okDatasheet/Q2N2222.pdf>

[51] Datasheet CL2N3. Mouser

<https://www.mouser.es/datasheet/2/268/20005448A-2907888.pdf>

[52] Datasheet LM317. Mouser

<https://www.mouser.es/datasheet/2/389/lm217-1849593.pdf>

[53] Datasheet disipador Fischer. RS Component.

<https://es.rs-online.com/web/p/disipadores/1899097>

[54] Datasheet disipador Seifert. RS Component.

<https://es.rs-online.com/web/p/disipadores/1805418>

[55] Datasheet disipador Fischer. RS Component.

<https://docs.rs-online.com/2bc4/0900766b80f3d7a3.pdf>

[56] Datasheet LM78XX. Mouser.

<https://www.mouser.com/datasheet/2/149/LM7812-461970.pdf>

[57] Datasheet LM2596. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>

[58] Powering a 12V bus with 24V batteries in automotive applications

https://e2e.ti.com/blogs_/b/behind_the_wheel/posts/powering-a-12v-bus-with-24v-batteries-in-automotive-applications

[59] Webench power designer. Texas Instrument.

<https://webench.ti.com/power-designer/>

[60] MAX25610A/MAX25610B Synchronous Buck and Buck-Boost LED Driver/DC-DC Converter. Analog Devices.

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX25610A-MAX25610B.pdf>

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Chip led azul con fósforo [1]	9
Figura 2. Piloto Audi A8 LED y OLED. [2]	10
Figura 3. Topología OLED [3]	10
Figura 4. Maleabilidad OLED[4]	10
Animación 1. Polarización directa LED [5]	11
Figura 5. Curva V-I LED por colores [6]	11
Figura 6. Espectro longitudes de onda. [7]	12
Tabla 1. Colores, longitud de onda, diferencia de potencial y materiales semiconductores	12
Tabla 2. Materiales semiconductores y su fórmula molecular	13
Figura 7. LED con disipador [8]	13
Figura 8. Faros Ford T [9]	14
Figura 9. Faro Philips halógeno con cristal estriado [10]	14
Figura 10. Ciclo regeneración halógeno [1]	15
Figura 11. Lámpara H4 [1]	15
Figura 12. Esquema lámpara Xenon [1]	15
Figura 13. Lámpara Xenon real [11]	15
Figura 14a. Capa de GaP con el sustrato absorbente GaAs [12]	16
Figura 14b. Diodo con capa gruesa y sustrato transparente [12]	16
Figura 14c. Arquitectura de chip TIP. [12]	16
Figura 15. Ejemplo proyector con reflexión. Audi Q4 e-tron. [13]	16
Figura 16. Ejemplo guía masiva. [14]	17
Figura 17. Ejemplo módulo con lente. [15]	17
Figura 18. Diagrama temperatura del color [1]	18
Figura 19. Comparativa temperatura color LED, Xenón y Halógeno [1]	18

Figura 20. Comparativa alcance de sistemas de iluminación[16]	19
Figura 21. Curva Isolux halógeno [1]	19
Figura 22. Curva Isolux Xenón [1]	19
Figura 23. Curva Isolux LED 30W [17]	20
Figura 24. Encapsulados LED [18]	21
Figura 25. Longitudes de onda y sus usos[19]	22
Figura 26. Intensidad lumínica [1]	23
Figura 27. Intensidad vs Ángulo de visión [1]	23
Figura 28. Candelas para diferentes funciones del automóvil [1]	24
Figura 29. Tail light y Stop (brake) light de VW Tiguan[20]	24
Figura 30. Flujo luminoso[1]	25
Figura 31. Picos de color que son percibidos por el ojo humano [1]	25
Figura 32. Diferencias en luminosidad [1]	25
Figura 33. Iluminancia [1]	26
Figura 34. Iluminancia de un faro Xenón [1]	26
Figura 35. Luminancia [1]	27
Figura 36. Luminancia para un DRL [1]	27
Figura 37. Funciones de iluminación y señalización[1]	28
Figura 38. Normativas para Iluminación en Europa[1]	28
Figura 39. Formas de luz según función [1]	29
Figura 40. Forma de corte LB [1]	29
Figura 41. Diferentes tipos de driver [12]	31
Figura 42. Regulador lineal básico.[21]	32
Figura 43. (a) Convertidor CC-CC básico conmutado. (b) Equivalente para conmutación.[21]	34
Figura 44. Tensión de salida. [21]	34

Figura 45. Convertidor CC-CC Reductor.[21]	35
Figura 46. Circuitos equivalente a interruptor cerrado y abierto.[21]	55
Figura 47. Circuito equivalente a interruptor cerrado[21]	37
Figura 48. Tensión en la bobina [21]	37
Figura 49. (a) Corriente en la bobina. (b) Corriente en el condensador [21]	37
Figura 50. Corriente en el condensador [21]	39
Figura 51. Circuito convertidor elevador. [21]	41
Figura 52. Circuito equivalente con el interruptor cerrado [21]	42
Figura 53. Tensión en la bobina [21]	42
Figura 54. Corriente en la bobina [21]	42
Figura 55. Corriente en el diodo [21]	42
Figura 56. Corriente en el condensador [21]	42
Figura 57. Esquema circuito reductor-elevador [21]	46
Figura 58. Corriente en la bobina [21]	48
Figura 59. Tensión en la bobina [21]	48
Figura 60. Corriente en el diodo [21]	48
Figura 61. Corriente en el condensador [21]	48
Figura 62. Tensión de salida C. Elevador con bobina no ideal [21]	53
Figura 63. Eficiencia C. Elevador con bobina no idea [21]	53
Figura 64. Transición simultánea de V e I. [21]	54
Figura 65. Transición peor caso [21]	54
Figura 66. Representación bucle de control [21]	55
Figura 67. Convertidor reductor con control [21]	55
Figura 68. Margen de fase [21]	56
Figura 69. Modelos de interruptor: 1) Interruptor y diodo, 2) Modelo promediado, 3) Modelo pequeña señal. [21]	57

Figura 70. Circuito para deducir función de transferencia del filtro con un condensador ideal [21]	58
Figura 71. Circuito para deducir función de transferencia del filtro con un condensador no ideal [21]	59
Figura 72. Proceso PW: Salida nivel alto cuando v_c del amp. de error es mayor que la onda diente de sierra. [21]	60
Figura 73. Amp. error compensado tipo 2. [21]	61
Figura 74. Respuesta en frecuencia [21]	61
Figura 75. Respuesta en frecuencia de la función de transferencia del bucle de control [21].	62
Figura 76. Esquema eléctrico de un faro [23]	65
Figura 77. Placa de experimentación [24]	66
Figura 78. Diagrama de bloques LED6000 [24]	66
Figura 79. Esquemático de la placa experimentación [24]	66
Figura 80. Arquitectura para 6 canales de control LED. [25]	68
Figura 81. Convertidor Buck en configuración típica para manejar LED [25]	69
Figura 82. Convertidor Buck-Boost derivado de un Buck [25]	69
Figura 83. Convertidor Boost derivado de un Buck [25]	69
Figura 84 (a). Convertidor flexible integrado MAX25610A [26]	70
Figura 84 (b). MAX25610A en aplicación Buck [60]	70
Figura 85. Esquemático de CI LT3932 (Buck) en aplicación LED. [27]	71
Figura 86. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Buck para LED [27]	72
Figura 87. Esquemático de CI LT8356-1 (Boost) [27]	72
Figura 88. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Boost para LED [27]	73
Figura 89. Convertidor Boost-buck [27]	73
Figura 90. Convertidor Boost-buck: LT8386. [27]	74

Figura 91. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Boost-Buck para LED [27]	74
Figura 92. Convertidor modo Buck [27]	75
Figura 93. Ejemplo modo Buck: LT3756-2. [27]	75
Figura 94. Ventajas y condiciones de uso para convertidor modo Buck para LED [27]	75
Figura 95. Ejemplo convertidor Buck-Boost [27]	76
Figura 96. Ventajas y condiciones de uso para convertidor Buck-Boost para LED [27]	76
Figura 97. Bloque simplificado de un LMM [29]	77
Figura 98. Variación de tensión en los LEDs [29]	78
Figura 99. Arquitectura sugerida para LMM [29]	78
Figura 100. Esquemático TPS92665 [33]	79
Figura 101. Esquemático TPS92667 [34]	79
Figura 102. TPS92667EVM-243 [35]	80
Figura 103. Señales radiadas y conducidas [37]	81
Figura 104. Análisis EMI [38]	81
Figura 105. Diferentes tipos de componentes para filtrar EMI [39]	81
Figura 106. Barrido EMI sin filtro instalado en placa. (CISPR - 25) [40]	82
Figura 107. Filtro típico EMI [40]	83
Figura 108. Barrido en frecuencia, sin y con amortiguamiento [40]	84
Figura 109. Barrido en frecuencia, sin y con ferrita [40]	85
Figura 110. Símbolo estándar Diodo LED y curva característica V-I [50]	88
Figura 111. Curva V-I LED por colores [6]	88
Figura 112. Tensión umbral por colores[12]	90
Figura 113. Circuito serie LED	90
Figura 114. Curva V-I LED Blanco	92

Figura 115. Comportamiento de la corriente frente tensión del LED	92
Figura 116. Circuito serie multiLED	94
Figura 117. Circuito paralelo LED	95
Figura 118. Extracto datasheet [46]	98
Figura 119. Extracto datasheet [46]	98
Figura 120. Extracto datasheet [47]	99
Figura 121. Extracto datasheet [47]	99
Figura 122. Extracto datasheet [48]	100
Figura 123. Extracto datasheet [48]	100
Figura 124. Extracto datasheet [49]	101
Figura 125. Extracto datasheet [49]	101
Figura 126. Circuito serie simulado pspice	102
Figura 127. Circuito paralelo simulado PSpice.	102
Figura 128. Símbolo estándar Diodo LED y curva característica V-I [50]	104
Figura 129. Curva V-I LED por colores [6]	104
Figura 130. Tensión umbral por colores[12]	106
Figura 131. Circuito serie LED	106
Figura 132. Circuito serie LED.	109
Figura 133 Circuito paralelo LED	110
Figura 134. Transistores polarizados	113
Figura 135. Transistor polarizado con D. Zener	113
Figura 136. Comportamiento V-I LED incrementando tensión de la fuente	116
Figura 137. Corriente LED a diferentes tiempos de ciclo	118
Figura 138. Comportamiento V-I LED diferentes valor alimentación	121
Figura 139. Circuito simulado en Pspice	122
Figura 140. Comportamiento V-I LED simulado en Pspice	123

Figura 141. Condiciones fuentes de alimentación variable	124
Figura 142. Comportamiento corriente diodo, base y colector con ante un pulso variable en pspice	124
Figura 143. Circuito con transistores polarizados y señal PWM en Pspice	125
Figura 144. Respuesta corriente media y forma de onda en el LED para un barrido de PWM en Pspice	126
Figura 145 Corriente media en el diodo ante barrido PWM en Pspice	127
Figura 146. Circuito Transistor polarizado con D. Zener	128
Figura 147. Comportamiento V-I LED a diferentes tensiones de alimentación simulado con Pspice.	128
Figura 148. Configuración fuente de alimentación variable en Pspice	129
Figura 149. Variación de corriente con un pulso al doble de la tensión de alimentación simulado en Pspice	130
Figura 150. Curva corriente de colector frente tensión en el transistor [50]	131
Figura 151. Corriente colector, corriente en el diodo y tensión base-emisor del transistor simulado.	132
Figura 152. Transistores polarizados .	133
Figura 153. Transistor polarizado con diodo	134
Figura 154 Encapsulados CL2N3 [51].	143
Figura 155. Estructura propuesta para CL2N3 [51]	143
Figura 156. V-I LED a diferentes tensiones de alimentación	144
Figura 157. Montaje CL2N3 con 4 LEDs a 30V de alimentación	145
Figura 158. Montaje 3 CL2N3 en paralelo con 3 LEDs a 14V de alimentación	145
Figura 159. Circuito propuesto para un LED de mayor potencia.	146
Figura 160. Encapsulados y pineado LM317 [52]	147
Figura 161. Extracto datasheet [52]	147
Figura 162 Extracto datasheet LM317 [52]	148

Figura 163 Extracto datasheet LM317 [52].	149
Figura 164 Extracto datasheet LM317 [52]	149
Figura 165. Imágenes diferentes disipadores [53][54]	150
Figura 166. Imágenes diferentes disipadores [55]	151
Figura 167. LM317 Esquemático en Pspice	152
Figura 168. Corriente por LM317 a diferentes tensiones de alimentación	152
Figura 169 Corriente en LM317 con señal PWM	153
Figura 170 Extracto datasheet LM317	155
Figura 171. Comportamiento V-I LED	156
Figura 172. Extracto datasheet LM78XX [56]	157
Figura 173. Extracto datasheet LM78XX, pinado [56]	157
Figura 174. Extracto datasheet LM78XX, esquema [56]	158
Figura 175. Extracto datasheet LM78XX [56]	158
Figura 176. Tensión de salida del regulador a diferentes tensiones de alimentación	159
Figura 177. Extracto datasheet [56]	160
Figura 178. Montaje laboratorio	160
Figura 179. Corriente y tensión de salida en LM7805	161
Figura 180. LM317 en Pspice	162
Figura 181. Configuración análisis en Bias point Pspice	163
Figura 182. Resultados obtenidos en la simulación	163
Figura 183. Circuito a simular en Pspice	164
Figura 184. Configuración de barrido en continua en Pspice	164
Figura 185 Resultado barrido en continua simulado en Pspice	165
Figura 186. Esquema Pspice con fuente pulsante	165
Figura 187. Configuración fuente pulsante Pspice	166

Figura 188. Respuesta del driver ante un pulso fuerte	167
Figura 189. Detalle de la respuesta del driver ante el pulso	167
Figura 190. Esquema LM7805 en Pspice	168
Figura 191. Configuración del barrido en continua.	168
Figura 192. Barrido en continua	169
Figura 193. Circuito LM7805 con fuente pulsante	169
Figura 194. Configuración fuente pulsante	170
Figura 195. Respuesta corriente por el driver ante pulso creciente en fuente alimentación	170
Figura 196. Esquema LM7805 como regulador de corriente	171
Figura 197. Configuración de barrido en continua	171
Figura 198. Respuesta del barrido en continua	172
Figura 199 Encapsulados CL2N3 [51].	174
Figura 200. Estructura propuesta para CL2N3 [51]	175
Figura 201. Encapsulados y pineado LM317 [52]	179
Figura 202. Extracto datasheet [52]	179
Figura 203 Extracto datasheet LM317 [52]	180
Figura 204 Extracto datasheet LM317 [52].	181
Figura 205 Extracto datasheet LM317 [52].	181
Figura 206. LM317 Esquemático en Pspice.	184
Figura 207 Extracto datasheet LM317 [52]	186
Figura 208. Extracto datasheet LM78XX [56]	188
Figura 209. Extracto datasheet LM78XX, pineado [56]	188
Figura 210. Extracto datasheet LM78XX, esquema [56]	189
Figura 211. Extracto datasheet [56]	191
Figura 212. Picos tensión batería[58]	195

Figura 213. Rangos tensión batería [58]	195
Figura 214. Esquema de bloques distribución electrónica en un automóvil	195
Figura 215. PCB Buck [12].	197
Figura 216. Extracto datasheet.	197
Figura 217. Extracto datasheet [57]	198
Figura 218. Eficiencia del CI	200
Figura 219. Inicio Webench [59]	200
Figura 220. Selector Webench [59]	201
Figura 221. Configurador de parámetros Webench[59]	201
Figura 222. Esquema devuelto por Webench [59]	202
Figura 223. Simulación Webench [59]	202
Figura 224. Onda tensión salida - corriente diodo Webench [59]	203
Figura 225. Onda corriente bobina y corriente diodo Webench [59]	204
Figura 226. Onda corriente diodo, bobina y de salida en Webench [59]	204
Figura 227. Selector Webench [59]	205
Figura 228. Selector circuito Webench [59]	205
Figura 229. Esquemático del circuito Webench [59]	206
Figura 230. Señal tensión de salida en Webench [59]	207
Figura 231. Tensión de salida, de conmutación y corriente en la bobina en Webench [59].	207
Figura 232. Tensión de conmutación y todas las corrientes de los elementos pasivos en Webench [59].	218
Figura 233. Picos tensión batería[58]	210
Figura 234. Rangos tensión batería [58]	210
Figura 235. Esquema de bloques distribución electrónica en un automóvil	210
Figura 236. PCB Buck [12].	212
Figura 237. Extracto datasheet [57]	213

Figura 238. Inicio Webench [59]	215
Figura 239. Selector Webench [59]	219