



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Trabajo Fin de Grado

CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA CON PLACAS HARDWARE DE BAJO COSTE Y SOFTWARE DE FABRICANTE: SIMULACIÓN Y MEDIDAS PRÁCTICAS

Alumno: Alberto Ramírez Fernández

Tutor: Juan Domingo Aguilar Peña
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

Abril, 2024

Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA CON PLACAS HARDWARE DE BAJO COSTE Y SOFTWARE DE FABRICANTE: SIMULACIÓN Y MEDIDAS PRÁCTICAS

Alumno: Alberto Ramírez Fernández

Tutor: Prof. D. Juan Domingo Aguilar Peña

Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Electrónica y Automática

Don Juan Domingo Aguilar Peña, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Medidas y simulación sobre estáticos de potencia con placas hardware de bajo coste y software de fabricante, que presenta Alberto Ramírez Fernández, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, 02 de Abril de 2024

El alumno:

Los tutores:

Alberto Ramírez Fernández

Juan Domingo Aguilar Peña

RESUMEN

La enseñanza de electrónica de potencia se beneficia enormemente de la integración de tecnologías accesibles como placas hardware económicas y software especializado. Estos recursos permiten a los estudiantes aplicar teorías en experimentos prácticos, promoviendo una comprensión más profunda y habilidades prácticas sólidas. Al utilizar herramientas de bajo costo, se hace que la educación sea más accesible y dinámica, fomentando la creatividad y la resolución de problemas. Esta combinación de teoría y práctica prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos del mundo real y promueve la innovación en electrónica de potencia.

ABSTRACT

The teaching of power electronics greatly benefits from the integration of accessible technologies such as low-cost hardware boards and specialized software. These resources enable students to apply theories in practical experiments, fostering deeper understanding and solid practical skills. By utilizing cost-effective tools, education becomes more accessible and dynamic, encouraging creativity and problem-solving. This combination of theory and practice prepares students to tackle real-world challenges and promotes innovation in power electronics.

Palabras clave: DC-DC, Convertidor, Software, Simulación, Módulo.

Índice general

1.- INTRODUCCIÓN	15
2.- CONTEXTO	17
3.- ANTECEDENTES	19
4.- OBJETIVOS.....	20
5.- METODOLOGÍA A DESARROLLAR.....	21
6.- INTRODUCCION A LOS CONVERTIDORES.....	24
6.1.- CONVERTIDOR REDUCTOR (BUCK)	27
6.2.- CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST)	29
6.3.- CONVERTIDOR SEPIC	31
6.4.- CONVERTIDOR CUK	33
7.- ESTUDIO Y COMPARACION DE LOS DIFERENTES SOFTWARES DE SIMULACIÓN	36
7.1.- MATLAB SIMULINK	38
7.2.- ORCAD PSPICE	40
7.3.- NI MULTISIM.....	41
7.4- LTSPICE IV	43
7.5- PSIM8	44
7.6- CASPOC.....	45
7.7- PLECS	47
7.8- SIMETRIX	48
7.9- RESUMEN Y CONCLUSIÓN DE SOFTWARES DE SIMULACIÓN.....	50
8.- ESTUDIO Y COMPARACION DE LAS DIFERENTES HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ONLINE QUE OFRECEN LOS FABRICANTES	52
8.1- EDESING SUITE DE ST MICROELECTRONICS	55
8.2- WEBENCH TEXAS INSTRUMENT	60
8.3- EE-SIM DESING TOOLS DE MAXIM INTEGRATED	65
8.4- ONSEMICONDUCTORS	67
8.5- LTPOWERCAD II	72
8.6- SEMISEL	76
8.7- CONCLUSIÓN DE LOS SIMULADORES ONLINE DE FABRICANTES.....	78
9.- MÓDULO L298N	79
10.- PLACAS DE BAJO COSTE UTILIZADOS EN LA DOCENCIA	85
10.1.- CONVERTIDORES BUCK CON MÓDULO LM2596	87
10.1.1.- REGULADOR 3A SIN DISPLAY	89
10.1.2.- REGULADOR DE VOLTAJE 3A CON DISPLAY Y CONTROLES DE USUARIO INTEGRADOS	95

10.1.3.- REGULADOR DE VOLTAJE DROK DE 3A CON DISPLAY Y CONTROLES DE USUARIO INTEGRADOS.....	100
10.2.- CONVERTIDOR BOOST XL6009	105
10.3.- CONVERTIDOR BUCK CON MÓDULO XL4015	110
10.4.- CONVERTIDOR BOOST CON MÓDULO MT3608	115
10.5.-RESUMEN Y CONCLUSIÓN DEL ANALISIS DE LOS MÓDULOS Y PRÁCTICAS	118
11.- BIBLIOGRAFÍA	119

Listado de figuras

Figura: 1 Diagrama de acceso de titulados al Master de Ingeniería Industrial	18
Figura: 2 Contenidos de sistemas electrónicos e instrumentación industrial.....	19
Figura: 3 Ejemplo de un convertidor reductor (Buck).....	27
Figura: 4 Graficas de las tensiones y corrientes con el tiempo en un convertidor reductor ideal en modo continuo	28
Figura: 5 Ejemplo de un convertidor elevador (Boost)	29
Figura: 6 Graficas de las tensiones y corrientes con el tiempo en un convertidor elevador ideal en modo continuo	30
Figura: 7 Ejemplo de un convertidor Sepic	31
Figura: 8 Ejemplo convertidor Cuk	34
Figura: 9 Simulación de respuesta en lazo abierto de convertidor Buck	39
Figura: 10 Gráfico del tiempo de encendido/apagado de los dos MOSFET y la corriente de la fuente de drenaje.	40
Figura: 11 Circuito de un convertidor Boost en pspice	40
Figura: 12 Circuito de un convertidor Buck simulado en Multisim	42
Figura: 13 Señal PWM representada en el Osciloscopio virtual de Multisim	42
Figura: 14 Ejemplo de convertidor Buck en NI Multisim	43
Figura: 15 Simulación de la tensión de salida y corriente por la bobina de un convertidor Buck en NI Multisim	43
Figura: 16 Diseño de convertidor Buck en LT Spice IV	44
Figura: 17 Forma de onda de la tensión a la salida representada en LT Spice IV	44
Figura: 18 Ejemplo de convertidor Buck en Psim8.....	45
Figura: 19 Simulación de la respuesta frecuencial del convertidor Buck en Psim8	45
Figura: 20 Página principal de Caspoc	46
Figura: 21 Ejemplo convertidor Buck en Caspoc.....	46
Figura: 22 Scope de la tensión y corriente por la bobina ante un escalon de la corriente de carga simulada en Caspoc	47
Figura: 23 Scope de la corriente por el condensador simulado en Caspoc.....	47
Figura: 24 Ejemplo convertidor Boost en Plecs	48
Figura: 25 Simulación de la corriente por la bobina y la tensión en la carga del convertidor Boost en Plecs	48
Figura: 26 Ejemplo convertidor Buck en Simetrix.....	50
Figura: 27 Simulación de la tensión corriente y potencia a la salida del convertidor Buck en Simetrix	50
Figura: 28 Página principal de la herramienta eDesingSuite.....	57
Figura: 29 Especificaciones del diseño en eDesignTool	57
Figura: 30 Convertidor A7986A en eDesignSuite.....	58
Figura: 29 Valores de diseño para nuestro convertidor en eDesignSuite	58
Figura: 32 Duty cycle, corriente por la bobina y tensión de entrada y salida del circuito representado en eDesignSuite.....	59
Figura: 33 Eficiencia para tensión mínima, máxima e intermedia del circuito representada en eDesignSuite.....	59
Figura: 34 Eficiencia y perdidas de potencia dentro del circuito representadas en eDesignSuite	60
Figura: 35 Especificaciones de diseño en Webench.....	61
Figura: 36 Circuito de ejemplo en Webench	62
Figura: 37 Comparativa de circuitos en Webench.....	62

Figura: 38 Simulaciones posibles en Webench	63
Figura: 39 Ejemplo de forma de onda para la tensión de salida al encender el convertidor TPS563300 en Webench.....	63
Figura: 40 Datos destacados en Webench	64
Figura: 41 Gráfica del ciclo de trabajo en función de la tensión de entrada del convertidor TPS563300 representada en Webench.....	64
Figura: 42 Gráfica de la eficiencia en función de la tensión de entrada del convertidor TPS563300 representada en Webench.....	64
Figura: 43 Especificaciones de diseño en EE-Sim	66
Figura: 44 convertidor MAX17624.....	66
Figura: 45 Graficas representativas en EE-Sim.....	66
Figura: 46 Eficiencia del circuito en función de la corriente representada en EE-Sim	67
Figura: 47 Valores de diseño en Onsemi.....	68
Figura: 48 Datos de los circuitos a elegir en Onsemi	69
Figura: 49 Circuito Buck de Ejemplo sobre el convertidor FAN251015MNTXG en Onsemi.....	69
Figura: 50 Grafica de la eficiencia en función de la corriente de salida para los distintos valores de corriente de salida cuando el rango de tensión de entrada varía entre min y max en Onsemi	69
Figura: 51 Grafica de la eficiencia en función de la tensión de entrada para los distintos valores de la corriente de carga en Onsemi	70
Figura: 52 Grafica del ciclo de trabajo para los distintos valores corriente de salida en Onsemi.....	70
Figura: 53 Grafica que representa la variación de temperatura en el semiconductor para los distintos valores de la corriente cuando el rango de tensión de entrada varía entre min y max en Onsemi	70
Figura: 54 Grafica de la disipación de la potencia respecto a la tensión de salida cuando el rango de tensión de entrada varía entre min y max del circuito en Onsemi	71
Figura: 55 Información de los valores del circuito	71
Figura: 56 BOM del circuito en Onsemi	72
Figura: 57 Introducción a LTPowerCAD (Opciones del convertidor)	72
Figura: 58 Topología y tipo del convertidor en LTPowerCAD.....	73
Figura: 59 Valores del convertidor en LTPowerCAD.....	73
Figura: 60 Ejemplo de variedad de convertidores en LTpowerCAD	73
Figura: 61 Eficiencia y perdidas dentro del convertidoren LTpowerCAD.....	74
Figura: 62 Diagrama de Bode en LTpowerCAD.....	74
Figura: 63 Convertidor LTM4673 en LTpowerCAD	75
Figura: 64 Tabla de las especificaciones del diseño	75
Figura: 65 Lista de materiales (BOM) en LTpowerCAD.....	76
Figura: 66 Convertidor Buck en Semisel Simulation	76
Figura: 67 Perdidas y Temperaturas en el convertidor simuladas en Semisel Simulation	77
Figura: 68 Ejemplo de selección de componentes en Semisel Simulation	77
Figura: 69 Controlador de motores L298N	79
Figura: 70 Diagrama de bloques del módulo L298N	80
Figura: 71 Pin out de la placa L298N.....	81
Figura: 72 Conexionado de la placa L298N con arduino	82
Figura: 73 Código simple en Arduino de la conexión con el módulo L298N	82
Figura: 74 Señal PWM al 50% generada por Arduino	83
Figura: 75 Señal PWM al 90% generada por Arduino	83
Figura: 76 Señal PWM al 10% generada por Arduino	84
Figura: 77 Señal PWM al 30% generada a la salida del regulador L298N	84

Figura: 78 Señal PWM al 70% generada a la salida del regulador L298N	85
Figura: 79 Diagrama de bloques del módulo LM2596.....	88
Figura: 80 Zonas de medida con el osciloscopio en el convertidor LM2595.....	89
Figura: 81 Convertidor LM2595	90
Figura: 82 Circuito interno e identificación de componentes del LM2596.....	90
Figura: 83 Placa LM2596 para identificación de componentes.....	90
Figura: 84 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	92
Figura: 85 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	92
Figura: 86 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida.....	93
Figura: 87 Eficiencia del circuito respecto a la tensión de salida	93
Figura: 88 Ciclo de trabajo al 40% del módulo LM2596 sin display	94
Figura: 89 Ciclo de trabajo al 80% del módulo LM2596 sin display.....	94
Figura: 90 Regulador LM2596 con display y botones	95
Figura: 91 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	97
Figura: 92 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	97
Figura: 93 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida.....	98
Figura: 94 Eficiencia respecto a la tensión de salida	98
Figura: 95 Ciclo de trabajo al 40% del módulo LM2596 sin display	99
Figura: 96 Ciclo de trabajo al 80% del módulo LM2596 sin display	99
Figura: 97 Regulador LM2596 configuración con display y 4 botones	100
Figura: 98 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	102
Figura: 99 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	102
Figura: 100 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida.....	103
Figura: 101 Eficiencia respecto a la tensión de salida	103
Figura: 102 Ciclo de trabajo al 40% del módulo LM2596 sin display	104
Figura: 103 Ciclo de trabajo al 80% del módulo LM2596 sin display	104
Figura: 104 Regulador Boost XL6009	105
Figura: 105 Diagrama de bloques del módulo XL6009	106
Figura: 106 Circuito interno regulador XL6009.....	107
Figura: 107 Encapsulado y pin out del módulo XL6009.....	107
Figura: 108 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	109
Figura: 109 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida	109
Figura: 110 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida.....	110
Figura: 111 Eficiencia respecto a la tensión de salida	110
Figura: 112 Regulador XL4015.....	111
Figura: 113 Encapsulado y pin out del módulo XL4015.....	112
Figura: 114 Diagrama de bloques del módulo XL4015	113
Figura: 115 Circuito interno del regulador XL4015.....	113
Figura: 116 Eficiencia a la salida para diferentes tensiones de salida en función de la corriente en el módulo XL4015	114
Figura: 117 Regulador MT3608.....	115
Figura: 118 Diagrama de bloques del módulo MT3608.....	116
Figura: 119 Circuito interno del regulador MT3608	116
Figura: 120 Encapsulado y pin out del módulo MT3608	117
Figura: 121 Eficiencia del Regulador MT3608.....	118

Listado de tablas

Tabla 1: Resumen de softwares de simulación.....	52
Tabla 2: Comparativa de softwares de fabricantes online.....	78
Tabla 3: Valores experimentales y teóricos del convertidor LM2596.....	91
Tabla 4: Valores experimentales y teóricos del convertidor LM2596 con display y 2 pulsadores.....	96
Tabla 5: Valores experimentales y teóricos del convertidor LM2596 con display y 4 pulsadores	101
Tabla 6: Valores experimentales y teóricos del convertidor XL6009 boost.....	108

1.- INTRODUCCIÓN

La electrónica de potencia es una disciplina crucial en la actualidad debido al aumento en la demanda energética y la necesidad de optimizar su consumo. Es fundamental que los estudiantes de ingeniería industrial tengan conocimientos teóricos y prácticos en esta área para desempeñarse en la industria.

Sin lugar a dudas, la experimentación en el laboratorio desempeña un papel crucial en las diversas disciplinas que conforman el plan de estudios de ingeniería. La electrónica de potencia, en particular, a menudo requiere considerables recursos para llevar a cabo prácticas relacionadas con los convertidores estáticos de potencia. Además, debido a la manipulación de altas tensiones y corrientes, puede plantear riesgos significativos para la seguridad de los estudiantes.

En nuestra revisión de las distintas fuentes de enseñanza en este campo, se han encontrado que algunos libros de texto están acompañados de software de simulación por ordenador. Esto proporciona una gran flexibilidad, mejora la seguridad y reduce los costos. De esta manera, los estudiantes pueden experimentar con diversos tipos de semiconductores y convertidores de potencia de manera online.

La búsqueda de métodos y herramientas de enseñanza eficaces, accesibles y motivadores es esencial para mejorar las habilidades y competencias de los futuros profesionales.

Este trabajo muestra la experiencia del uso de soluciones comerciales de convertidores de potencia de bajo coste en una asignatura de Máster de Ingeniería Industrial.

Para tener un concepto claro de lo que es la electrónica de potencia y lo que supone llevarla a la práctica expondremos los siguientes puntos:

1. **Relevancia de la Electrónica de Potencia:** La electrónica de potencia es una disciplina significativa que se encuentra en los programas académicos de diversas especialidades de la ingeniería industrial. Esta disciplina aborda el diseño y funcionamiento de dispositivos electrónicos para controlar y convertir energía eléctrica.
2. **Enseñanza Teórica y Práctica:** Las asignaturas relacionadas con la electrónica de potencia no solo ofrecen enseñanza teórica, sino que también incorporan prácticas de laboratorio específicas. Estas prácticas permiten a los estudiantes poner en práctica los conceptos aprendidos y experimentar con diferentes tipos de convertidores estáticos.
3. **Desafíos en el Laboratorio:** Las prácticas de laboratorio suelen realizarse en equipos costosos y difíciles de mantener. Esta situación presenta desafíos para las instituciones educativas, ya que los recursos limitados pueden restringir la calidad y cantidad de prácticas que los estudiantes pueden realizar.
4. **Uso de Simulaciones:** Para abordar los desafíos de costos y recursos, muchas instituciones complementan la enseñanza práctica en el laboratorio con el uso

de programas de simulación. Estas herramientas permiten a los estudiantes experimentar virtualmente con circuitos y sistemas electrónicos sin la necesidad de equipos físicos.

5. **Importancia en la Industria:** Dado que la industria busca profesionales con un sólido conocimiento tanto teórico como práctico en electrónica de potencia, se enfatiza la necesidad de desarrollar métodos y herramientas de enseñanza efectivos que no solo sean asequibles, sino que también motiven a los estudiantes y mejoren sus habilidades profesionales.
6. **Innovaciones en la Enseñanza:** Debido a los desafíos económicos y a la búsqueda de enfoques más efectivos, algunos profesores han optado por diseñar sus propios equipos de laboratorio o utilizar sistemas modulares a partir de componentes básicos. Además, la disponibilidad creciente de placas electrónicas de bajo costo ofrece oportunidades adicionales para la experimentación en el aula.

Una vez revisados los puntos anteriores, procederemos a detallar y enumerar los apartados desarrollados en este texto.

Comenzamos con la introducción, donde se destaca la importancia de la electrónica de potencia y su enseñanza para contextualizar el trabajo.

En el segundo capítulo, se describe el contexto del trabajo, delineando el entorno y las circunstancias que han influenciado su desarrollo.

Posteriormente, en el tercer capítulo se procede a examinar los antecedentes de la investigación, abordando estudios previos y estableciendo así la línea de investigación que sustenta este estudio.

En el cuarto capítulo, se detallan los objetivos específicos del estudio con el propósito de brindar una guía clara para la investigación, lo que proporciona una dirección definida para el trabajo.

Para el quinto capítulo nos centraremos en la metodología utilizada se explica detalladamente, abarcando los procedimientos y enfoques empleados en el desarrollo de la investigación.

En el sexto capítulo, se ofrece una visión general sobre convertidores de potencia, seguida de la explicación resaltando su importancia en aplicaciones de electrónica de potencia.

En el séptimo capítulo se profundizará en el análisis de herramientas y software de simulación, donde se destacan sus aplicaciones específicas.

En el octavo capítulo, el análisis se centra en el estudio y comparación de las diferentes herramientas de simulación online que nos ofrecen los fabricantes.

En el noveno capítulo se procede a describir y analizar en detalle el módulo L298N, centrándose en su funcionamiento y aplicaciones en la electrónica de potencia.

En el noveno capítulo, se presentan las placas de bajo coste que pueden ser utilizadas en la docencia, por su bajo coste y sus características.

Por último, en el décimo primer capítulo tenemos una bibliografía que incluye referencias a artículos, libros y trabajos de fin de grado que han contribuido al desarrollo y fundamentación del trabajo.

2.- CONTEXTO

Dentro de la línea de trabajo iniciada por distintos profesores del Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática de la Universidad de Jaén, se han llevado a cabo diversos trabajos relacionados con la utilización de placas de bajo coste para la docencia en el ámbito de la electrónica. Como muestra de estos esfuerzos, se pueden mencionar algunas comunicaciones recientes en conferencias relacionadas con el tema.

Uno de los trabajos en esta área presentado por Aguilar-Pena, J.D. [1] trata sobre placas comerciales de bajo coste con uso comercial. En [2] se amplía este trabajo centrándose más en el uso de placas de circuitos comercial de bajo coste para prácticas con estudiantes de ingeniería.

Estos artículos abordan la posibilidad de cómo las placas DC-DC pueden ser utilizadas como recursos didácticos. Abordó aspectos como la implementación práctica de estas placas en el contexto educativo, sus aplicaciones y cómo su uso puede mejorar la comprensión de los estudiantes sobre los principios de los sistemas electrónicos, así como su relevancia en la industria.

Se destaca la importancia de utilizar herramientas de simulación prácticas y accesibles para fomentar una mejor comprensión de los conceptos teóricos, ofreciendo una experiencia más práctica y aplicada en la enseñanza de la electrónica.

Estos ejemplos demuestran el interés y el compromiso del Departamento de Ingeniería Electrónica en la promoción de la educación en el campo de la electrónica mediante la utilización de placas de bajo coste como herramientas docentes.

El contexto en el que se enmarca este trabajo, está relacionado con una asignatura troncal del master de Ingeniería Industrial “Sistemas Electrónicos e Instrumentación”

El plan de estudios de Ingeniería Industrial impartido en la Universidad de Jaén, consta de 120 créditos ECTS, estructurados en materias obligatorias que suman un total de 78 créditos, Trabajo Fin de Máster con 12 créditos, y 30 créditos adicionales en materias optativas (complementos de formación). Las materias obligatorias se dividen en tres módulos: (1) Módulo de Tecnologías Industriales (40 ECTS), (2) Módulo de Gestión (18 ECTS) y (3) Módulo de Instalaciones, plantas y construcciones complementarias (20 ECTS) (*figura 1*).

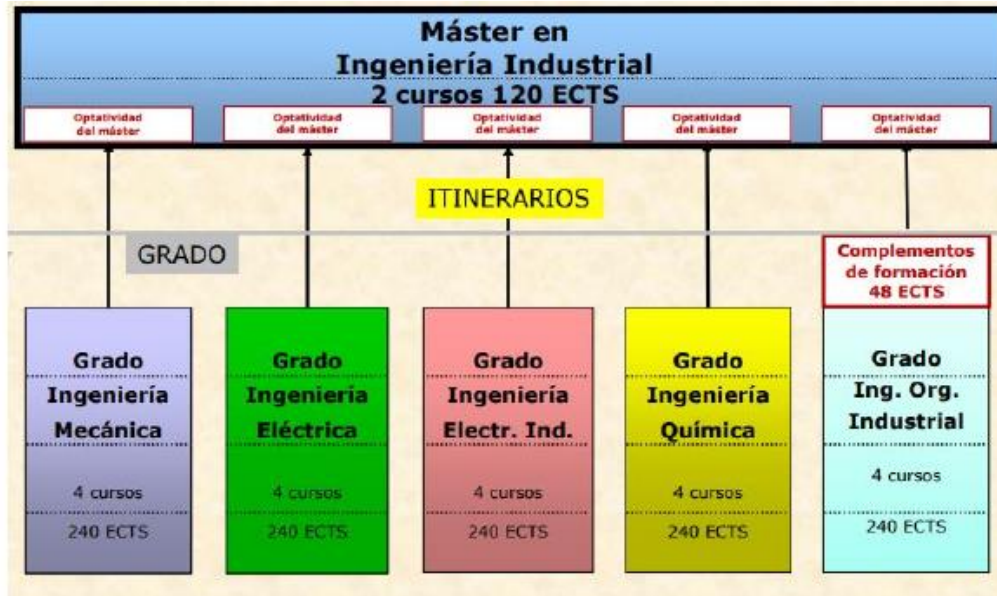


Figura: 1 Diagrama de acceso de titulados al Master de Ingeniería Industrial

De las 16 asignaturas del módulo de materias obligatorias, solo una contiene contenidos relacionados con la Tecnología Electrónica, que tenga prácticas de laboratorio: "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial". Según la memoria del Máster, se le asigna la competencia específica "CE07: Capacidad para diseñar sistemas electrónicos y de instrumentación industrial" con un total de 5 créditos ECTS, repartidos equitativamente entre las dos materias que conforman la asignatura.

El Máster en Ingeniería Industrial permite la matrícula de Graduados en Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Electrónica Industrial, Química y Organización Industrial, además de otras titulaciones que deben de hacer unas asignaturas complementarias. Debido a esta gran heterogeneidad, las asignaturas optativas de complementos de formación tratan de que todos los estudiantes del programa adquieran las mismas competencias, independientemente de la especialidad que hayan cursado antes del Máster. Este módulo consta de nueve asignaturas de diversas materias, de las cuales el alumno debe cursar 30 créditos en función de su especialidad previa.

En cuanto a las materias optativas, hay dos de ellas relacionadas con la electrónica: "Electrónica Analógica y Digital", que tiene como objetivo complementar los conocimientos adquiridos en la asignatura troncal común para todos los alumnos del grado en ingeniería "Fundamentos de Electrónica", y "Control Automático y Electrónica Programada", en la que se imparten fundamentos de microcontroladores. Ambas asignaturas tienen 4 ECTS y solo se imparten teoría y resolución de problemas en la pizarra, sin prácticas en el laboratorio de electrónica.

Este trabajo que se presenta está enmarcado dentro de la asignatura troncal "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial", troncal que se imparte en el segundo cuatrimestre del primer curso del Máster de Ingeniería Industrial. Los contenidos de esta

asignatura hacen que resulte idónea para la puesta en práctica de la labor presentada, como así se ha venido realizando en los últimos años académicos. Los temas abordados en esta asignatura se encuentran detallados en la tabla (Figura 2). En la primera sección de la asignatura se transmiten conocimientos fundamentales sobre convertidores estáticos de potencia, con un énfasis especial en las fuentes de alimentación conmutadas o convertidores DC-DC.

<i>Bloque 1: Sistemas electrónicos (1,5CT+1 CP ECTS)</i>
Convertidores electrónicos de potencia.
Fuentes de alimentación (reguladas y conmutadas)
Aplicaciones de sistemas electrónicos
<i>Bloque 2: Sistemas de adquisición de datos e instrumentación industrial (1,5CT+1 CP ECTS)</i>
Filtrado
Sensores y transductores.
Circuitos de acondicionamiento de señal
Software industrial
Instrumentación industrial y comunicaciones industrial

Figura: 2 Contenidos de sistemas electrónicos e instrumentación industrial

3.- ANTECEDENTES

En términos generales, los dispositivos de conversión DC - DC son de gran utilidad en la actualidad para regular una tensión continua para su uso posterior, ya sea aumentando o reduciendo su magnitud. En el ámbito educativo, el estudio de estos dispositivos proporciona conocimientos tanto en el control como en la potencia, áreas muy relevantes dentro de la electrónica.

En particular, en la Universidad de Jaén, en el departamento de Electrónica, se han llevado a cabo trabajos de investigación relacionados con la electrónica en el ámbito educativo, y específicamente el tutor de este trabajo ha trabajado en esta línea en los últimos años como se puede ver en las líneas de investigación mencionadas posteriormente.

En [1] se plantea el objetivo de realizar experimentos prácticos con placas y circuitos electrónicos comerciales para analizar su utilidad en la enseñanza práctica de convertidores electrónicos. Se evaluaron placa de experimentación de Texas Instruments TI-PMLK Boost y la placa LM2596 de Drok, midiendo tensiones y corrientes en diferentes condiciones. El propósito era determinar si son adecuados para propósitos educativos y discutir su impacto en el aprendizaje de los estudiantes.

En [2] se describe la experiencia desarrollada mediante un proyecto de innovación docente durante los cursos realizado 2020/21 y 2021/22. Complementa el artículo anterior el análisis de conceptos y herramientas hardware de bajo costo, además de simulaciones electrónicas realizadas con herramienta online suministradas por los fabricantes o herramientas clásicas de simulación, normalmente utilizadas en electrónica. En esta fase, se implementa la experiencia en el aula-laboratorio y se presentan los resultados con alumnos de diversos perfiles académicos, introduciéndolos a conceptos avanzados de electrónica de potencia con escasos conocimientos previos.

Finalmente, se detallan las herramientas hardware y software seleccionadas para esta experiencia en el aula.

Trabajos fin de grado previos realizados de este tema, en la Escuela Politécnica Superior de Jaén y tutorizados por el mismo profesor, dan lugar al inicio de esta línea de trabajo que se plasmó finalmente en las mencionadas comunicaciones. Algunos de ellos son, el trabajo de Daniel Cintas Cintas [3], en el que se aborda una investigación técnica que se centra en la experimentación y la medición de un convertidor Boost DC-DC utilizando una placa de evaluación denominada PMLKBOOSTVMB. El trabajo se enfoca en el análisis detallado de este tipo de convertidor y sus características específicas, con el objetivo de proporcionar información relevante sobre su funcionamiento y rendimiento.

También podemos destacar el trabajo de Adrián Polo Campos [4]. Este trabajo está relacionado con el desarrollo de una propuesta educativa que se centra en la enseñanza de sistemas electrónicos de potencia utilizando hardware y software de bajo coste. La propuesta incluye estrategias de enseñanza, materiales didácticos, y métodos de aprendizaje que permiten a los estudiantes adquirir conocimientos en sistemas electrónicos de potencia de manera efectiva y económica.

En estos trabajos se ha analizado tanto teórica como experimentalmente la forma de mejorar la docencia y elegir los convertidores de bajo coste que faciliten el aprendizaje por parte de los alumnos, además de estudiar los softwares que apoyen esos conocimientos.

Uno de los mayores problemas a la hora de impartir la docencia en la electrónica de potencia es la rápida obsolescencia de la tecnología y la necesidad constante de mantenerse actualizado para enseñar a los estudiantes con las últimas herramientas y tendencias de la industria, esto acompañado de la diversidad de alumnos con diferentes conocimientos que acceden a él. Por esto se busca adecuar las enseñanzas para que todos los alumnos comprendan y adquieran dichos conocimientos dentro de lo que abarca la electrónica de potencia

4.- OBJETIVOS

Dentro del contexto del programa del máster en Ingeniería Industrial, se observa una notable diversidad en el nivel de conocimientos en electrónica entre los estudiantes matriculados en asignaturas como Sistemas Electrónicos y disciplinas afines. Esta disparidad plantea el desafío de encontrar métodos y recursos que permitan una comprensión eficaz de los conceptos en un período de tiempo relativamente corto, para asegurar que todos los alumnos adquieran las competencias necesarias, para esto se han buscado y analizado varios convertidores de bajo costo que resulten interesantes para el desarrollo de las prácticas.

Por ende, el propósito principal de este estudio radica en llevar a cabo un análisis de las prácticas existentes en el plan de estudios, con el objetivo de identificar áreas de mejora

y proponer estrategias que optimicen el proceso de aprendizaje de los alumnos con diferentes conocimientos que acceden desde los diferentes grados de Ingeniería.

Para lograr este propósito, se emprendió una evaluación de las prácticas en uso en la actualidad. Se procedió a repetir estas prácticas, obteniendo nuevos resultados y gráficas a partir de las placas DC-DC, tanto elevadoras como reductoras. Durante este proceso, se dedicó especial atención a la observación de los estudiantes mientras llevaban a cabo las prácticas. Se analizaron los desafíos y obstáculos que enfrentaron, identificando así las áreas donde se presentaron mayores dificultades y las posibles causas subyacentes. Este análisis no solo permitió comprender mejor el proceso de aprendizaje de los alumnos, sino que también ofreció información valiosa para adaptar y mejorar las prácticas futuras.

Asimismo, se realizará una comparativa de diversas plataformas de software de simulación de circuitos, con el fin de determinar cuál ofrece las herramientas más adecuadas para fortalecer la comprensión de los principios fundamentales de la electrónica. Además, se explorarán y evaluarán las herramientas de diseño en línea desarrolladas por fabricantes, las cuales tienen como objetivo sumergir a los alumnos en aplicaciones prácticas del mundo real, proporcionando una experiencia tangible y relevante para su formación académica y profesional.

En última instancia, este estudio aspira a contribuir al proceso educativo, proporcionando una base sólida para la implementación de prácticas más efectivas y recursos educativos que fomenten el éxito y el desarrollo integral de los estudiantes en el ámbito de los sistemas electrónicos. Finalmente, se llevará a cabo una investigación sobre el convertidor L298N. Este dispositivo, un convertidor de cuatro cuadrantes controlado por Arduino, se presenta como un recurso intrigante para consolidar los conocimientos relacionados con los convertidores y ofrecer una experiencia práctica en el ámbito de los motores controlados. El estudio del L298N proporcionará una comprensión más profunda de cómo los convertidores operan en el control de motores, permitiendo a los estudiantes adquirir habilidades prácticas y una apreciación más amplia de la aplicación de los convertidores en el mundo real.

5.- METODOLOGÍA A DESARROLLAR

Primero, se inicia el trabajo con un estudio de antecedentes relacionados con los convertidores DC-DC y las placas de experimentación. Este proceso implicó una investigación en diversas fuentes de información, como libros especializados como [8] y [9] o en artículos científicos desarrollados en la línea de investigación como [1] y [2]. El propósito principal fue establecer una base teórica sólida que sirviera como fundamento para el trabajo posterior.

Una vez analizados los antecedentes se procede a realizar una introducción a los tipos de convertidores DC-DC que podemos encontrar para tener una base sobre lo que son y los posibles usos que estos tienen.

Después, se procedió a explorar y utilizar el software y las aplicaciones proporcionadas por los fabricantes, específicamente diseñadas para el diseño y simulación de placas de convertidores DC-DC. Esta fase permitió simular el comportamiento de los convertidores en diferentes escenarios, antes de pasar a la implementación práctica en las placas de experimentación.

Seguidamente, se realizó un estudio minucioso de las características técnicas y funcionales de las diversas placas de experimentación DC-DC disponibles en el mercado. Se examinaron aspectos como el rango de aplicación, las capacidades de simulación, la compatibilidad con el software de diseño, el precio y otros criterios relevantes. El objetivo era evaluar las opciones disponibles y determinar cuáles serían las más adecuadas para cumplir con los objetivos del proyecto.

Posteriormente, se llevaron a cabo experimentos prácticos utilizando las placas de experimentación disponibles en el laboratorio. Estos experimentos permitieron adquirir experiencia directa con las placas y evaluar su funcionamiento en un entorno controlado. Se recopilaron datos sobre el rendimiento y las capacidades de las placas, lo que facilitó una evaluación más completa de su idoneidad para el proyecto.

Después de completar la experimentación, se procedió a realizar una comparación de las diferentes opciones de placas de experimentación DC-DC disponibles en el mercado. Se consideraron aspectos como el precio, el entorno de trabajo, el rango de aplicación y otros criterios relevantes. Esta comparación ayudó a identificar las fortalezas y debilidades de cada opción y proporcionó una base sólida para la toma de decisiones futuras.

Finalmente, como una extensión natural del proyecto, se llevó a cabo una práctica con el controlador de motores L298N, en conjunto con una introducción a la plataforma Arduino para el control de motores de corriente continua. Esta práctica proporcionó una oportunidad adicional para aplicar los conocimientos adquiridos y explorar nuevas tecnologías y herramientas en el contexto de los convertidores DC-DC y el control de motores.

Una vez vistos los puntos a tratar también haremos una breve introducción a los convertidores que se ha estudiado tanto en teoría como en práctica y los softwares que utilizaremos como apoyo, además de la posibilidad de introducir nuevos convertidores y softwares para un futuro uso en la docencia.

En cuanto a los convertidores encontrados que pueden ser de gran utilidad en la docencia en cuanto a características y precio tenemos:

- **LM2596:** Convertidor Buck con el cual se han realizado las prácticas propuestas con distintas placas que implementan este modelo.
- **XL4015:** Convertidor Buck que puede resultar interesante en un futuro por sus características y precio.

- **XL6009:** Convertidor Boost, con el cual se han realizado las prácticas propuestas.
- **MT3608:** Convertido Buck-Boost versátil que puede funcionar como un reductor o elevador de voltaje.
- **L298N:** Convertidor y troceador aplicado al control de motor DC de baja potencia y que se controlará con Arduino.

Softwares comerciales de simulación de circuitos electrónicos

- **Matlab Simulink:** Es un software muy utilizado en el ámbito de la ingeniería y posiblemente conocido por los alumnos.
- **Orcad Pspice:** Software muy potente para realizar cualquier diseño de circuitos y muy popular en la ingeniería, sobre todo en electrónica.
- **NI Multisim:** Software que destaca por su interfaz intuitiva y posibilidad de diseños. Al ser adquirido por National instrument permite utilizar una gran cantidad de recursos de este fabricante. Permite enlazar con su plataforma hardware y con LabVIEW
- **LTspice IV:** Software gratuito suministrado por Linear Technology muy completo y utilizado por ingenieros
- **Psim8:** Software específico para simulación de circuitos electrónicos de potencia y control de motores.
- **Caspoc:** Software que destaca por su manual intuitivo y que facilita la realización de los circuitos.
- **Plecs:** Es un software de simulación y diseño de sistemas de energía eléctrica.
- **SIMetrix:** Este simulador se centra en la simulación de circuitos analógicos y mixtos, además tiene una interfaz intuitiva y es muy completo a nivel de componentes. Este es muy utilizado por grandes empresas del sector.

Softwares de diseño gratuito suministrado por los fabricantes de circuitos integrados

- **EdesingSuite:** Una suite de diseño gráfico gratuita desarrollada por STMicroelectronics.

- **Webench:** Una herramienta de diseño creada por Texas Instrument en línea para ingenieros que simplifica la selección y diseño de circuitos electrónicos, este además cuenta con una versión gratuita.
- **EE-Sim Design Tools:** Herramientas de diseño y simulación en línea gratuita para circuitos eléctricos y electrónicos creada por Analog Devices.
- **ON Semiconductor:** Herramienta de diseño para circuitos totalmente gratuita diseñada por Onsemi.
- **LTPowerCAD II:** Es una herramienta de software para el diseño y simulación de sistemas de potencia y convertidores electrónicos. Esta herramienta es desarrollada por Analog devices, es instalable y gratuita.
- **Semisel semiconductors:** Es una herramienta gratuita creada por Semikron para la ayuda al diseño de circuitos eléctricos y electrónicos de potencia.

6.- INTRODUCCION A LOS CONVERTIDORES

En este trabajo nos centraremos en los convertidores DC-DC, estos son dispositivos electrónicos utilizados para convertir una fuente de corriente continua (DC) a otro nivel de tensión continua, para ello haremos una breve explicación de su funcionamiento y posibles usos, pero no ahondaremos en los conceptos teóricos. Estos convertidores desempeñan un papel fundamental en una amplia variedad de aplicaciones, como fuentes de alimentación, sistemas de energía renovable, electrónica de automoción, telecomunicaciones y más.

Para una mayor profundización en los convertidores, se destacan referencias bibliográficas como: el texto “Fundamentals of Power Electronics” [5], este es un libro ampliamente utilizado que cubre los principios básicos y las aplicaciones de la electrónica de potencia. Es conocido por su cobertura integral de temas como circuitos de conversión de energía, convertidores, técnicas de control y aplicaciones en diversos campos como sistemas de energía renovable, vehículos eléctricos y más. El libro suele ser un recurso fundamental para estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería eléctrica, ya que proporciona comprensión teórica junto con conocimientos prácticos sobre electrónica de potencia. “Power Supplies for LED Driving” [6] en este texto basado en fuentes de alimentación para la iluminación led, podemos encontrar información relevante de la importancia del aislamiento galvánico entre los componentes del conversor, para ello se destacan nuevas tipologías de conversores como el Sepic y Cuck.

La principal función de un convertidor DC-DC es regular la tensión de salida, proporcionando un nivel de tensión continuo y estable según los requerimientos del sistema. Dependiendo de las necesidades específicas, se pueden utilizar diferentes tipos de convertidores DC-DC, cada uno con sus propias características y modos de operación.

Los convertidores DC-DC son dispositivos electrónicos utilizados para convertir una fuente de corriente continua (DC) a otro nivel de tensión continua. Estos convertidores desempeñan un papel fundamental en una amplia variedad de aplicaciones, como fuentes de alimentación, sistemas de energía renovable, electrónica de automoción, telecomunicaciones y más.

La principal función de un convertidor DC-DC es regular la tensión de salida, proporcionando un nivel de tensión continuo y estable según los requerimientos del sistema. Dependiendo de las necesidades específicas, se pueden utilizar diferentes tipos de convertidores DC-DC, cada uno con sus propias características y modos de operación.

- **Convertidor reductor (Buck):** También conocido como convertidor step-down, este tipo de convertidor reduce la tensión de entrada a una tensión de salida menor. Es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere una menor tensión de salida que la fuente de alimentación.
- **Convertidor elevador (Boost):** El convertidor elevador aumenta la tensión de entrada a una tensión de salida más alta. Es útil cuando se necesita una tensión de salida mayor que la fuente de alimentación disponible.
- **Convertidor reductor-elevador (Buck-Boost):** Este tipo de convertidor puede reducir o aumentar la tensión de entrada a la tensión de salida requerida, lo que lo hace versátil para aplicaciones con requisitos de tensión variables.
- **Convertidor Sepic (Single-Ended Primary Inductance Converter):** Es un convertidor similar al Buck-Boost que se utiliza cuando se requiere una regulación precisa del voltaje de salida este tipo de convertidor permite regulación de tensión con aislamiento galvánico, además es versátil y se utiliza comúnmente en aplicaciones donde se requiere un rango amplio de voltajes de entrada y salida.
- **Convertidor Cuk:** Es un tipo de convertidor DC-DC que utiliza una topología de doble inductor y doble capacitor para convertir un voltaje de entrada a un voltaje de salida que puede ser mayor o menor que el voltaje de entrada. Con su diseño peculiar de componentes duales, este convertidor ofrece flexibilidad en la regulación del voltaje de salida, eficiencia razonable y capacidad para trabajar con voltajes de entrada superiores o inferiores al voltaje deseado de salida. Se utiliza en diversas aplicaciones donde se requiere una regulación eficaz del voltaje con aislamiento opcional entre la entrada y la salida.

Los convertidores DC-DC se basan en principios de conmutación, donde los componentes clave como inductores, capacitores y transistores se utilizan para controlar y regular la tensión de salida. Estos dispositivos requieren un diseño cuidadoso y un control adecuado para garantizar una operación eficiente y confiable.

Es importante tener en cuenta que el diseño y la implementación de convertidores DC-DC pueden involucrar consideraciones adicionales como la eficiencia energética, la capacidad de respuesta dinámica, la supresión de ruido y la protección contra sobretensiones. Además, existen diversas técnicas de control y modulación que se utilizan para mejorar el rendimiento de los convertidores DC-DC.

Los componentes comunes que se utilizan en un circuito reductor son los siguientes:

- **Transformador:** Es un componente clave en un circuito reductor. Permite convertir el voltaje de entrada en un nivel de voltaje más bajo en la salida. Los transformadores constan de bobinas de alambre enrolladas alrededor de un núcleo de hierro. Hay transformadores step-down (reductores) que reducen el voltaje de entrada.
- **Resistencia:** Las resistencias se utilizan en circuitos reductores para limitar la corriente eléctrica. Pueden ayudar a ajustar el voltaje o la corriente a un nivel específico en el circuito. Las resistencias se expresan en ohmios (Ω) y se conectan en serie o en paralelo según la configuración deseada.
- **Diodo Zener:** Los diodos Zener son dispositivos semiconductores diseñados para mantener un voltaje constante en un rango determinado. Se utilizan comúnmente en circuitos reductores para proporcionar un voltaje de referencia estable.
- **Condensador:** Los condensadores se utilizan en algunos circuitos reductores para almacenar carga eléctrica. Pueden ayudar a suavizar las fluctuaciones de voltaje y mejorar la estabilidad del circuito.
- **Regulador de voltaje:** Un regulador de voltaje es un componente electrónico diseñado para mantener un voltaje constante en la salida, incluso cuando varía el voltaje de entrada. Hay varios tipos de reguladores de voltaje, como los reguladores lineales y los reguladores conmutados (switching), que se utilizan en circuitos reductores para mantener una salida estable.

Estos son algunos de los componentes comunes utilizados en los circuitos reductores. Sin embargo, la selección y combinación de componentes específicos dependerá de los requisitos y características particulares del circuito y la aplicación en cuestión.

En resumen, los convertidores DC-DC son dispositivos esenciales en la electrónica de potencia y tienen una amplia gama de aplicaciones. Comprender los principios básicos de funcionamiento y las características de los diferentes tipos de convertidores es fundamental para el diseño, implementación y utilización adecuada de estos dispositivos en diversas aplicaciones.

6.1.- CONVERTIDOR REDUCTOR (BUCK)

El convertidor reductor, también conocido como convertidor Buck, es un tipo de convertidor DC-DC que reduce la tensión de entrada a una tensión de salida menor. Es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se necesita una tensión de salida más baja que la fuente de alimentación disponible, a continuación, un ejemplo de convertidor Buck (figura 3).

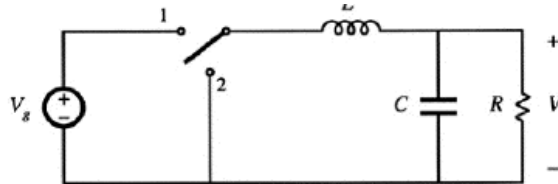


Figura: 3 Ejemplo de un convertidor reductor (Buck)

Principio de funcionamiento: El convertidor Buck se basa en el principio de conmutación, donde se utiliza un interruptor (generalmente un transistor MOSFET) y un inductor en conjunto con un diodo y un capacitor.

Durante el ciclo de conmutación, el interruptor se enciende y apaga periódicamente para controlar el flujo de corriente a través del inductor. El inductor almacena energía durante el periodo en que el interruptor está encendido y la entrega al capacitor y la carga durante el periodo en que el interruptor está apagado. Cuando el interruptor está encendido, la corriente fluye a través del inductor y la tensión de entrada se aplica directamente a la carga. Durante este periodo, el inductor almacena energía en su campo magnético. Cuando el interruptor se apaga, la corriente del inductor sigue fluyendo a través del diodo y carga el capacitor y la carga. Durante este periodo, el inductor libera energía almacenada, lo que permite mantener una tensión de salida más baja que la tensión de entrada.

En la Figura 4 se puede ver el ciclo de trabajo y como varían las tensiones y corrientes con el tiempo, que realiza un convertidor Buck en modo continuo. Además, lo acompañamos de las siguientes fórmulas para obtener la tensión de salida y el ciclo de trabajo.

Primero se definirá el ciclo de trabajo que será:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} = T_{on} * f \quad (6.1)$$

Para el tiempo de conducción se tiene:

$$V_L = V_S - V = L * \frac{di}{dt} \rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{V_S - V}{L} \quad (6.2)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_S - V}{L} * D * T \quad (6.3)$$

Para el tiempo de no conducción se tiene:

$$V_L = -V = L * \frac{di}{dt} \rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{-V}{L} \quad (6.4)$$

$$\Delta i_L = \frac{-V}{L} * (1 - D) * T \quad (6.5)$$

Por último, tenemos que:

$$\Delta i_{L\ Total} = \Delta i_{L\ ON} + \Delta i_{L\ OFF} = \frac{V_S - V}{L} * D * T + \frac{-V}{L} * (1 - D) * T = 0 \quad (6.6)$$

Por lo que se nos queda una tensión de salida que depende de:

$$V = D * V_S \quad (6.7)$$

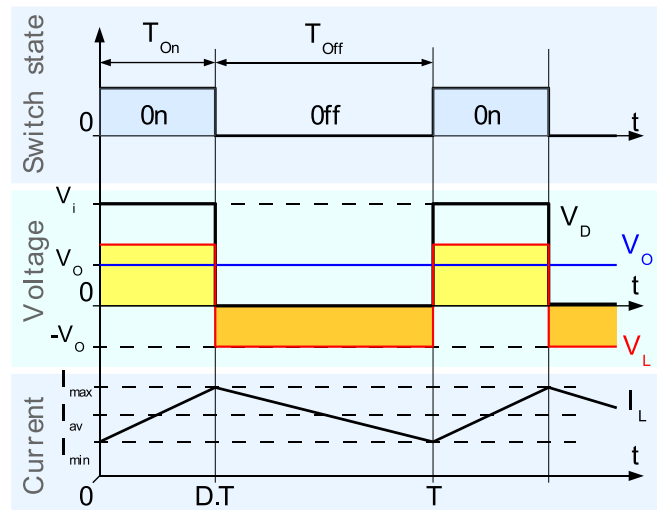


Figura: 4 Graficas de las tensiones y corrientes con el tiempo en un convertidor reductor ideal en modo continuo

Ejemplos de aplicación: El convertidor Buck es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones donde se requiere una tensión de salida menor que la fuente de alimentación. Algunos ejemplos comunes de aplicación incluyen:

1. Fuentes de alimentación conmutadas: El convertidor Buck es utilizado en fuentes de alimentación conmutadas para proporcionar una tensión de salida estabilizada y eficiente en dispositivos electrónicos como computadoras, televisores, teléfonos móviles, entre otros.
2. Sistemas de iluminación LED: El convertidor Buck se utiliza en circuitos de control de iluminación LED para reducir la tensión de entrada y alimentar de manera eficiente las luces LED con la tensión adecuada.

3. Sistemas de energía solar: En sistemas de energía solar, los convertidores Buck se utilizan para reducir la tensión de los paneles solares a una tensión compatible con la carga o el sistema de almacenamiento de energía.
4. Aplicaciones automotrices: En vehículos automotrices, el convertidor Buck se utiliza para alimentar sistemas electrónicos de baja tensión, como sensores, sistemas de entretenimiento y dispositivos de control.

6.2.- CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST)

El convertidor elevador, también conocido como convertidor Boost, es un tipo de convertidor DC-DC que aumenta la tensión de entrada a una tensión de salida más alta. A diferencia del convertidor Buck, el convertidor Boost es utilizado cuando se necesita una tensión de salida mayor que la fuente de alimentación disponible, a continuación, un ejemplo de convertidor Boost (*figura 5*).

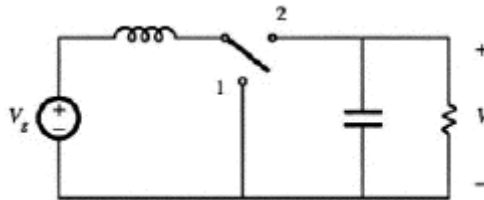


Figura: 5 Ejemplo de un convertidor elevador (Boost)

Principio de funcionamiento: El convertidor Boost también se basa en el principio de conmutación y utiliza componentes como un inductor, un interruptor (generalmente un transistor MOSFET), un diodo y un capacitor. Durante el ciclo de conmutación, el interruptor se enciende y apaga periódicamente para controlar el flujo de corriente a través del inductor. Cuando el interruptor está encendido, la corriente fluye desde la fuente de alimentación hacia el inductor, almacenando energía en su campo magnético. Durante este periodo, el capacitor en la salida se carga con la tensión de entrada. Cuando el interruptor se apaga, la corriente del inductor sigue fluyendo a través del diodo y del capacitor hacia la carga. Durante este periodo, el inductor libera la energía almacenada, elevando la tensión de salida por encima de la tensión de entrada. El resultado es una tensión de salida mayor que la tensión de entrada, y la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada depende del ciclo de trabajo del interruptor (proporción del tiempo encendido y apagado) y de la relación entre los valores del inductor, el capacitor y la carga.

En la Figura 6 se puede ver el ciclo de trabajo y como varían las tensiones y corrientes con el tiempo, que realiza un convertidor Boost en modo continuo. Además, lo acompañamos de las siguientes fórmulas para obtener la tensión de salida y el ciclo de trabajo.

Primero se definirá el ciclo de trabajo que viene dado por la formula (6.1).

Para el tiempo de conducción se tiene:

$$V_L = V_S = L * \frac{di}{dt} \rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (6.8)$$

$$\Delta i_{L\ ON} = \frac{V_S}{L} * D * T \quad (6.9)$$

Para el tiempo de no conducción se tiene:

$$V_L = V_S - V = L * \frac{di}{dt} \rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{V_S - V}{L} \quad (6.10)$$

$$\Delta i_{L\ OFF} = \frac{V_S - V}{L} * (1 - D) * T \quad (6.11)$$

Por último, tenemos que:

$$\Delta i_{L\ Total} = \Delta i_{L\ ON} + \Delta i_{L\ OFF} = \frac{V_S}{L} * D * T + \frac{V_S - V}{L} * (1 - D) * T = 0 \quad (6.12)$$

Por lo que se nos queda una tensión de salida que depende de:

$$V = \frac{V_S}{1 - D} \quad (6.13)$$

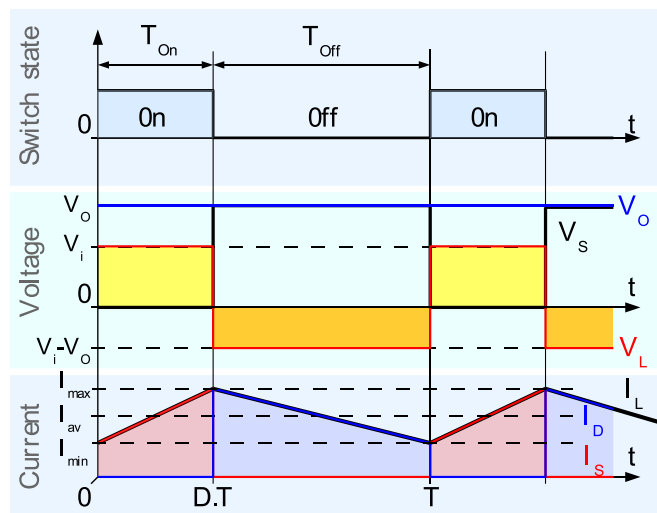


Figura: 6 Graficas de las tensiones y corrientes con el tiempo en un convertidor elevador ideal en modo continuo

Ejemplos de aplicación: El convertidor Boost se utiliza en diversas aplicaciones donde se requiere elevar la tensión de entrada a una tensión de salida mayor.

Algunos ejemplos comunes de aplicación incluyen:

1. Sistemas de iluminación Led: El convertidor Boost se utiliza para elevar la tensión de entrada y suministrar la tensión necesaria para alimentar las luces LED de alta potencia.
2. Aplicaciones de energía solar: En sistemas de energía solar, el convertidor Boost se utiliza para elevar la tensión de los paneles solares a una tensión compatible con la carga o el sistema de almacenamiento de energía.
3. Sistemas de alimentación de vehículos: En vehículos eléctricos e híbridos, el convertidor Boost se utiliza para elevar la tensión de la batería y suministrar la tensión requerida por los diferentes componentes del vehículo.
4. Fuentes de alimentación portátiles: Los convertidores Boost también se utilizan en aplicaciones de fuentes de alimentación portátiles para elevar la tensión de la batería y proporcionar una salida de tensión más alta.

6.3.- CONVERTIDOR SEPIC

El convertidor Sepic (Single-Ended Primary Inductance Converter) (Figura 7) es un tipo de convertidor DC-DC que permite la conversión de un voltaje de entrada a uno de salida, ya sea mayor o menor que el voltaje de entrada. Una de sus características principales es su capacidad para proporcionar aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, esto implica crear una separación eléctrica entre diferentes partes del circuito, lo que garantiza que no haya conexión conductora directa. Esta medida de seguridad es crucial para prevenir descargas eléctricas y proteger tanto el equipo como a los usuarios. Además, el aislamiento galvánico evita la formación de bucles de tierra, lo que ayuda a reducir el riesgo de introducir ruido o interferencias no deseadas en el sistema. Además, esta separación eléctrica facilita la conexión entre partes del sistema que operan a diferentes potenciales eléctricos, sin el peligro de daños o interferencias

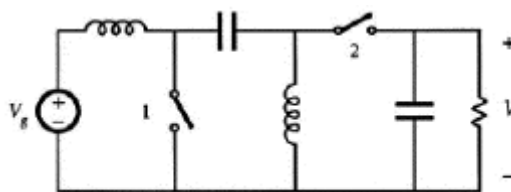


Figura: 7 Ejemplo de un convertidor Sepic

El diseño del Sepic es versátil y útil en situaciones donde el voltaje de entrada puede fluctuar o donde se necesita una salida de voltaje que no se encuentre directamente disponible desde la fuente. Algunas de sus características clave incluyen:

1. **Regulación de Voltaje**: El Sepic puede proporcionar un voltaje de salida estable incluso cuando el voltaje de entrada varía dentro de ciertos límites.

2. **Topología de Conversión:** Puede convertir un voltaje de entrada a uno de salida mayor o menor, dependiendo de la configuración del circuito.
3. **Aislamiento:** Puede proporcionar aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, si se requiere.
4. **Eficiencia:** Puede lograr una eficiencia relativamente alta en comparación con otros convertidores.
5. **Aplicaciones:** Se utiliza en una variedad de aplicaciones, como sistemas de alimentación de baterías, cargadores de dispositivos, sistemas de iluminación, entre otros.

El principio de funcionamiento del convertidor Sepic implica la conversión de energía utilizando un inductor, un interruptor (generalmente un transistor), un capacitor y un diodo. Funciona en dos modos diferentes dependiendo de la relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida deseado.

Cuando el voltaje de entrada es mayor que el voltaje de salida, el Sepic opera en modo de elevación de voltaje:

1. **Fase de Encendido (modo de conmutación):** Durante esta fase, el interruptor (transistor) se cierra, lo que permite que la corriente fluya desde la fuente de entrada a través del inductor. En este momento, el inductor almacena energía.
2. **Fase de Apagado (modo de liberación de energía):** El interruptor se abre y la energía almacenada en el inductor busca una vía para circular. El diodo se polariza directamente, permitiendo que la energía del inductor se transfiera al capacitor y a la carga.

Cuando el voltaje de salida es mayor que el voltaje de entrada, el convertidor opera en modo de reducción de voltaje, donde el inductor cumple una función diferente, permitiendo un voltaje de salida menor:

1. **Fase de Encendido:** Durante esta fase, el interruptor (transistor) se cierra, permitiendo que la corriente fluya desde la fuente de entrada a través del inductor. El inductor almacena energía.
2. **Fase de Apagado:** Similar al modo de elevación de voltaje, el interruptor se abre, pero en este caso, la energía almacenada en el inductor no se libera directamente a la salida. En lugar de eso, la energía fluye a través del diodo hacia la carga y el capacitor. El capacitor suministra energía a la carga mientras el inductor se encarga de mantener la corriente constante.

Sin embargo, la implementación eficiente del control y la gestión de la relación de voltaje entre la entrada y la salida son aspectos críticos para optimizar su rendimiento en una aplicación específica.

En cuanto a su aplicación, podemos destacar:

1. **Fuentes de Alimentación Portátiles:** Los convertidores Sepic se utilizan en dispositivos portátiles, como cargadores de teléfonos móviles o baterías externas. Pueden tomar una amplia gama de voltajes de entrada (como los provenientes de baterías) y ajustarlos a los niveles requeridos para cargar dispositivos móviles.
2. **Iluminación Led:** Los convertidores Sepic son útiles en sistemas de iluminación led, ya que permiten adaptar la tensión de entrada a la requerida por los led. Esto ayuda a controlar el brillo y la intensidad de la luz.
3. **Sistemas de Energía Renovable:** En aplicaciones como paneles solares o sistemas eólicos, donde la entrada de energía puede variar, los convertidores Sepic se utilizan para adaptar y regular eficientemente la energía generada a los niveles necesarios para cargar baterías o alimentar dispositivos.
4. **Automoción:** En vehículos eléctricos o híbridos, los convertidores Sepic pueden emplearse para ajustar el voltaje proveniente de las baterías al necesario para el sistema de propulsión u otros componentes del vehículo.
5. **Electrónica Industrial:** Se utilizan en sistemas de automatización industrial para adaptar diferentes niveles de voltaje entre distintos componentes.

Estos ejemplos resaltan la versatilidad de los convertidores Sepic en la regulación de voltaje en una variedad de aplicaciones, ofreciendo eficiencia y flexibilidad en la gestión de la energía.

La operación del Sepic implica la utilización de inductores, condensadores, y un circuito de conmutación para controlar la transferencia de energía y regular el voltaje de salida. Al ser capaz de trabajar con voltajes de entrada más altos y más bajos que el voltaje de salida deseado, el Sepic se ha convertido en una opción popular en aplicaciones donde se necesita una regulación de voltaje confiable y flexible.

6.4.- CONVERTIDOR CUK

El convertidor Cuk (Figura 8) se distingue de otros convertidores DC-DC por su topología de dos inductores y dos capacitores, lo que proporciona una mayor flexibilidad en el diseño y una regulación suave de corriente y voltaje. Con menor estrés en los componentes y la capacidad opcional de proporcionar aislamiento galvánico, el Cuk es una opción versátil para una variedad de aplicaciones, desde sistemas de energía renovable hasta fuentes de alimentación de conmutación, ofreciendo eficiencia y precisión en la conversión de energía.

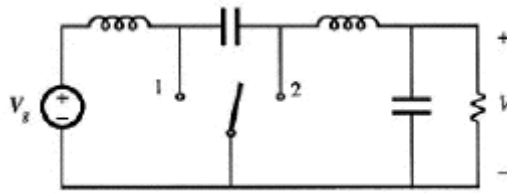


Figura: 8 Ejemplo convertidor Cuk

El diseño del convertidor Cuk se caracteriza por varias particularidades:

1. **Topología de Doble Inductor y Doble Capacitor:** A diferencia de otros convertidores, el Cuk utiliza dos inductores y dos capacitores en su diseño, lo que permite mayor flexibilidad en la regulación del voltaje de salida y en la relación de conversión de voltaje.
2. **Aislamiento:** Puede proporcionar aislamiento galvánico entre la entrada y la salida si se requiere.
3. **Regulación de Voltaje:** Es capaz de regular eficientemente el voltaje de salida incluso cuando el voltaje de entrada varía.
4. **Eficiencia:** Puede lograr una eficiencia razonablemente alta en comparación con otros tipos de convertidores.
5. **Baja Corriente de Entrada:** En comparación con otros convertidores, el Cuk tiende a requerir una corriente de entrada más baja.
6. **Aplicaciones:** Se utiliza en una variedad de aplicaciones, como sistemas de alimentación para dispositivos electrónicos, sistemas de iluminación, aplicaciones industriales, entre otros.

El principio de funcionamiento del convertidor Cuk se basa en un circuito que consta de un inductor, dos capacitores, un interruptor (generalmente un transistor), un diodo y un capacitor de salida. El convertidor Cuk tiene la capacidad de proporcionar una ganancia de voltaje o una reducción según la necesidad.

Su funcionamiento se divide en dos ciclos de conmutación principales:

1. **Fase de Encendido:**

- Durante esta fase, el interruptor se cierra permitiendo que la corriente fluya desde la fuente de entrada a través del inductor.
- El inductor almacena energía mientras la corriente aumenta.

2. Fase de Apagado:

- El interruptor se abre y el inductor busca una vía para descargar la energía almacenada. Esta energía se transfiere tanto al capacitor de salida como a la carga.
- El capacitor de salida proporciona energía a la carga durante este ciclo.
- El diodo permite que la energía almacenada en el inductor fluya hacia el capacitor de salida y la carga.

El diseño del convertidor Cuk permite tanto la reducción como la elevación del voltaje de salida, lo que lo hace útil en diversas aplicaciones donde se necesita un voltaje de salida diferente al de entrada.

Este convertidor tiene ventajas como un rizado de corriente y voltaje más bajos en comparación con otros convertidores, así como una mayor eficiencia en algunos rangos de voltaje de entrada y salida. Sin embargo, su diseño y control son más complejos en comparación con otros convertidores como el Sepic o el Boost, lo que puede requerir una implementación más cuidadosa y un control más sofisticado para un rendimiento óptimo.

En cuanto a su aplicación, podemos destacar:

1. **Fuentes de Alimentación:** Los convertidores Cuk son eficientes para fuentes de alimentación con aislamiento galvánico, como en aplicaciones industriales o de telecomunicaciones. Pueden manejar un amplio rango de voltajes de entrada y salida con buen rendimiento.
2. **Sistemas de Energía Renovable:** Se utilizan en sistemas de energía solar y eólica para controlar la carga de baterías. Los convertidores Cuk son útiles para adaptar la tensión generada por paneles solares o turbinas eólicas a los niveles requeridos para cargar baterías.
3. **Iluminación LED:** Al igual que los convertidores SEPIC, los Cuk son empleados en sistemas de iluminación LED para ajustar y controlar la corriente y el voltaje suministrados a los LEDs, permitiendo un control más preciso de la iluminación.
4. **Electrónica de Consumo:** En aplicaciones como cargadores portátiles, sistemas de audio, o electrónica doméstica, los convertidores Cuk pueden ser utilizados para gestionar la energía de manera eficiente, adaptando los diferentes niveles de voltaje.
5. **Vehículos Eléctricos:** En el contexto de la movilidad eléctrica, los convertidores Cuk pueden ser empleados en sistemas de carga de vehículos eléctricos, adaptando la energía proveniente de la red eléctrica para cargar las baterías de los vehículos.

El convertidor Cuk, al igual que otros convertidores DC-DC, ofrece flexibilidad en la gestión de energía, permitiendo adaptar y controlar eficientemente los niveles de voltaje y corriente en una variedad de aplicaciones.

7.- ESTUDIO Y COMPARACION DE LOS DIFERENTES SOFTWARES DE SIMULACIÓN

En este apartado se realizará una breve descripción de los softwares de simulación encontrados, que nos podrían ayudar a reforzar los conocimientos obtenidos en la asignatura. Además, haremos una comparativa entre los diferentes softwares, para ver los pros y contras que podríamos tener para optimizar el tiempo y obtener los mayores conocimientos posibles.

La disponibilidad de herramientas de simulación fáciles de utilizar ofrecidas, representa un avance significativo en la educación y la aplicación de la electrónica de potencia. Estas herramientas brindan una serie de beneficios tanto para estudiantes como para la industria. A continuación, exploraremos estos beneficios en detalle.

En primer lugar, la simulación facilita el proceso de aprendizaje y comprensión de la electrónica de potencia. Los circuitos de potencia a menudo involucran componentes complejos y cálculos teóricos que pueden resultar desafiantes para los estudiantes. Con estas herramientas, los alumnos pueden aplicar la teoría directamente a través de la simulación de circuitos. Esto les permite experimentar con diferentes configuraciones y parámetros sin la necesidad de montar físicamente un circuito, lo que ahorra tiempo y recursos. Además, pueden verificar los cálculos teóricos realizados en problemas o prácticas de clase, lo que refuerza su comprensión y confianza en la materia.

En segundo lugar, estas herramientas de simulación actúan como un puente entre la teoría académica y la industria de dispositivos semiconductores de potencia. Esta conexión entre la teoría y la industria es invaluable para los futuros ingenieros y profesionales, ya que les ayuda a comprender cómo se utilizan los dispositivos en aplicaciones del mundo real.

En resumen, la disponibilidad de herramientas de simulación, beneficia tanto a los estudiantes como a la industria. Facilita la comprensión y aplicación de la electrónica de potencia al permitir a los alumnos simular circuitos y verificar cálculos teóricos. Además, conecta a los estudiantes con la industria al brindar acceso a modelos precisos de componentes y datasheets de fabricantes reales. Esta sinergia entre la academia y la industria es esencial para la formación de profesionales capacitados y preparados para abordar los desafíos de la electrónica de potencia en el mundo real.

Entre los simuladores que se han encontrado, destacamos los siguientes:

- **Matlab Simulink:** Es un entorno de simulación gráfico utilizado para modelar y simular sistemas dinámicos, incluyendo circuitos electrónicos. Es una

herramienta ampliamente utilizada en ingeniería y ciencias aplicadas para el diseño y análisis de sistemas y procesos. <https://matlab.mathworks.com>

- **Orcad-PSpice4:** Es un software de simulación de circuitos electrónicos que permite a los usuarios diseñar, simular y analizar circuitos con una interfaz gráfica intuitiva. Es utilizado en la industria y la academia para evaluar el rendimiento y la funcionalidad de los diseños electrónicos. PSpice ofrece análisis en el dominio del tiempo y frecuencia, así como simulaciones avanzadas para una amplia gama de componentes electrónicos. <https://www.orcad.com/pspice>
- **NI Multisim:** Es un software de diseño y simulación de circuitos electrónicos. Permite crear y simular circuitos utilizando una interfaz gráfica intuitiva. Es ampliamente utilizado en la industria y la educación para el diseño y análisis de circuitos. <https://www.ni.com/es.html>
- **LTspice IV:** Es un software gratuito de simulación de circuitos electrónicos desarrollado por Linear Technology (ahora parte de Analog Devices). Permite a los usuarios crear y simular circuitos analógicos y mixtos, incluyendo componentes activos y pasivos. Es ampliamente utilizado por ingenieros y diseñadores para el análisis y la verificación de circuitos antes de su implementación física. <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- **PSIM8:** Especifico para simulación de circuitos electrónicos de potencia y control de motores, demos con ejemplos y posibilidad de diseñar, manual de usuario detallado. Esquemático (SIMCAD), simulador (PSIM Simulator) y un entorno de visualización (SIMVIEW). Existe interface entre PSIM y MATLAB/SIMULINK. Es utilizado por ingenieros y diseñadores para evaluar el rendimiento y optimizar el diseño de sistemas de potencia. <https://powersimtech.com/>
- **Simplorer:** Es un software de simulación de sistemas multidominio desarrollado por Ansys que también es utilizado para el análisis y diseño de convertidores DC-DC. Con su enfoque orientado a sistemas, Simplorer permite a los diseñadores modelar y simular convertidores DC-DC junto con otros componentes y sistemas en un entorno integrado. Proporciona herramientas avanzadas de simulación y análisis para evaluar el rendimiento de los convertidores DC-DC, incluyendo eficiencia, respuesta transitoria y estabilidad. Simplorer facilita el diseño y la optimización de convertidores DC-DC para lograr un mejor rendimiento y eficiencia energética. Es un software bastante complejo por lo que no lo utilizaremos como herramienta para la enseñanza. <https://www.ansys.com/>
- **Caspoc:** Es un software de simulación y diseño de sistemas multidisciplinarios desarrollado por Powersim. Permite modelar y simular sistemas eléctricos, electrónicos, mecánicos, térmicos y de control. Es utilizado por ingenieros y científicos para analizar y optimizar el rendimiento de sistemas complejos en múltiples dominios, además tiene animaciones interactivas en las simulaciones. <https://www.caspoc.com/>

- **PLECS:** Es un software de simulación y diseño de sistemas de energía eléctrica desarrollado por Plexim. Permite modelar y simular sistemas de potencia, incluyendo convertidores, controladores y sistemas de energía renovable. Es ampliamente utilizado en la industria para el análisis y la optimización de sistemas de energía antes de su implementación física. <https://www.plexim.com/products/plecs>
- **SIMetrix:** Este simulador se centra en la simulación de circuitos analógicos y mixtos. Ofrece una amplia gama de herramientas de análisis y una interfaz intuitiva. Es un software demo instalable que ofrece una gran cantidad de posibilidades de diseño ya que cuenta con una gran cantidad de elementos que podemos utilizar dentro de nuestro circuito. <https://www.simetrix.co.uk/>

7.1.- MATLAB SIMULINK

Matlab Simulink es una poderosa herramienta de programación genérica desarrollada por MathWorks, que ofrece una versión online gratuita para un uso básico de la herramienta. Sin embargo, esta versión no permite la instalación de herramientas especializadas necesarias para llevar a cabo diseños más complejos y específicos. Por otro lado, la versión instalable de 30 días ofrece la posibilidad de instalar toolbox específicas, lo que amplía significativamente su funcionalidad y capacidad.

Estas toolbox especializadas abarcan una amplia gama de aplicaciones y disciplinas. En nuestro caso, nos enfocaremos en el diseño y la simulación de circuitos electrónicos. Para este propósito, Matlab Simulink proporciona toolbox específicas que contienen bloques funcionales que representan componentes individuales, como resistencias, capacitores, inductores, transistores y muchos otros elementos fundamentales en la electrónica.

Estos bloques funcionales permiten a los usuarios construir modelos detallados de circuitos electrónicos, facilitando la simulación y el análisis del comportamiento de los mismos bajo diferentes condiciones. Esta capacidad de modelado y simulación en Matlab Simulink es fundamental para el desarrollo y la optimización de sistemas electrónicos en una amplia variedad de campos, incluyendo la electrónica de potencia, el control de sistemas, la comunicación inalámbrica, entre otros. (Enlace <https://matlab.mathworks.com/>)

Para adentrarse más a fondo en la aplicación de la herramienta MATLAB Simulink en el contexto de la electrónica de potencia, especialmente en lo que respecta a la conmutación de dispositivos electrónicos, el diseño de circuitos de conversión de energía, la operación de rectificadores, la funcionalidad de inversores y la implementación de convertidores DC-DC, podemos recurrir al texto de R. W. Erickson and D. Maksimović [5]. Este libro abarca los principios fundamentales de la electrónica de potencia, que son esenciales para el diseño y análisis de sistemas de conversión de

energía. Estos conceptos son aplicables en el entorno de MATLAB Simulink para modelar y simular sistemas de electrónica de potencia.

Una vez creado el modelo del circuito, Simulink ofrece una amplia gama de herramientas y opciones de simulación. Puedes simular el comportamiento del circuito en el dominio del tiempo, realizar análisis de frecuencia, respuesta transitoria, análisis de estabilidad y más.

Además, Simulink permite incorporar código MATLAB dentro del modelo, lo que brinda una gran flexibilidad y capacidad para implementar algoritmos personalizados y realizar análisis más avanzados. También es posible interactuar con el modelo en tiempo real, ajustando parámetros y observando los resultados mientras la simulación se ejecuta.

En resumen, MATLAB Simulink es una poderosa herramienta de simulación que permite diseñar, simular y analizar circuitos electrónicos de manera eficiente y precisa. Su interfaz gráfica intuitiva y su integración con MATLAB lo convierten en una opción popular para ingenieros y científicos que trabajan en el campo de la electrónica, sin embargo, al tener alumnos de diferentes grados que no tengan conocimientos sobre lazos de control y la propia herramienta de Simulink, se considera que es altamente complejo para realizar los circuitos durante el desarrollo de las prácticas.

Aquí pondremos un ejemplo de un convertidor Buck en Matlab Simulink (figura 9). Esta muestra cómo modelar una fuente de alimentación conmutada que convierte una fuente de alimentación de 30 V CC en una fuente de alimentación regulada de 15 V C. El modelo captura el tiempo de encendido/apagado de los dispositivos (Figura 10), dependiendo esto principalmente de los valores de capacitancia y la resistencia de salida del controlador PWM. Para obtener mayor información, este se encuentra dentro de la página web de Matlab (<https://es.mathworks.com/help/sps/ug/buck-converter-example-ee-switching-power-supply.html>)

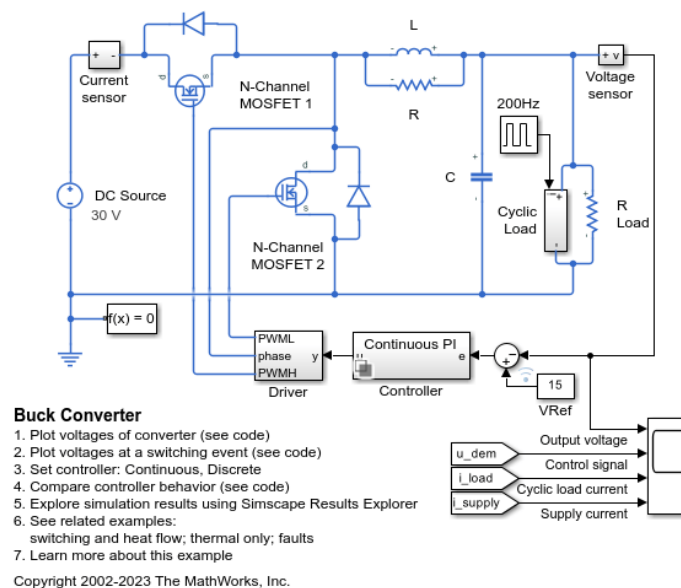


Figura: 9 Simulación de respuesta en lazo abierto de convertidor Buck

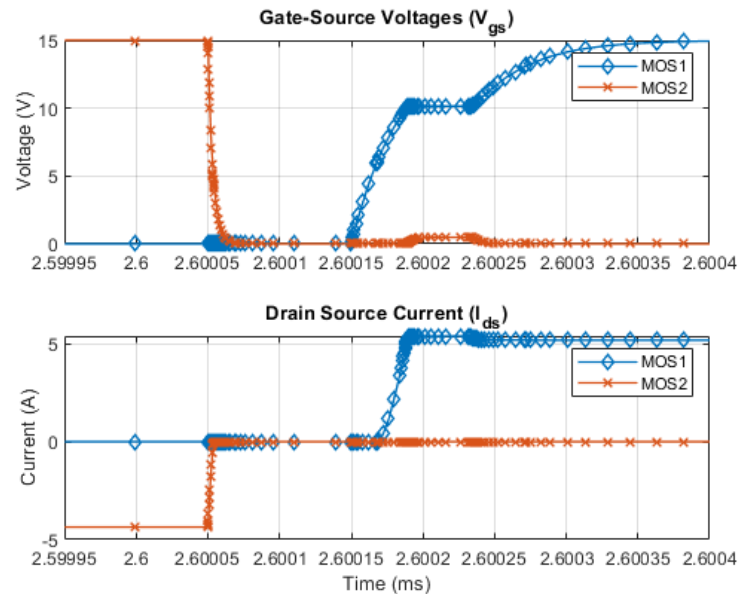


Figura: 10 Gráfico del tiempo de encendido/apagado de los dos MOSFET y la corriente de la fuente de drenaje.

7.2.- ORCAD PSPICE

OrCAD PSpice es un software de simulación de circuitos electrónicos ampliamente utilizado en la academia, debido a su software instalable con licencia para estudiantes que permite a los alumnos disfrutar de un programa muy completo y potente. Desarrollado por Cadence Design Systems. OrCAD PSpice permite a los usuarios diseñar, simular y analizar circuitos eléctricos y electrónicos de manera eficiente y precisa. (<https://www.orcad.com/pspice>)

Existen distintos textos referenciados a la utilización de Pspice en electrónica de potencia como puede ser libro de Ned Mohan [7] y Rashid [8], esta es una obra que se adentra en los fundamentos y aplicaciones de la electrónica de potencia, con un enfoque particular en los convertidores en el apartado 7. El libro proporciona una base sólida para comprender los principios teóricos y prácticos que subyacen en los convertidores además de otras muchas ramas de la electrónica de potencia y sus aplicaciones en el mundo real. Dentro del libro podemos encontrar los conceptos básicos para utilizar esta herramienta y además varios ejemplos de circuitos conversores como se puede ver en la siguiente imagen (Figura 9).

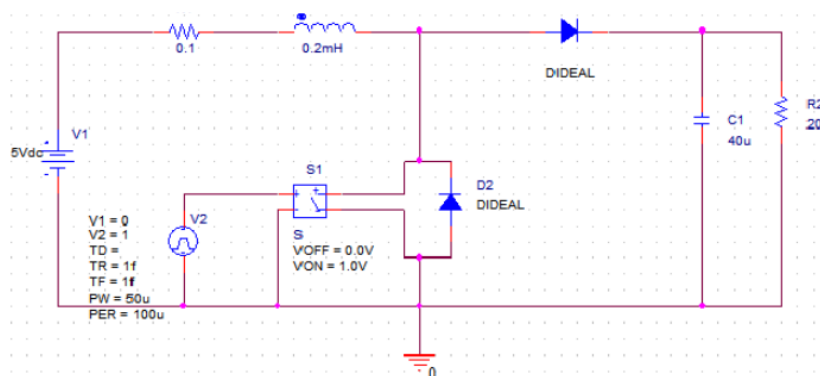


Figura: 11 Circuito de un convertidor Boost en pspice

Para una profundización en Orcad PSpice se puede recurrir a los libros D. W. Hart [5] y M. H. Rashid [8], en los cuales podemos encontrar información interesante para el desarrollo de los circuitos.

El software proporciona una interfaz gráfica intuitiva que permite a los usuarios construir circuitos mediante la selección de componentes electrónicos de una biblioteca integrada. La biblioteca incluye una amplia gama de componentes, como resistencias, capacitores, inductores, transistores, amplificadores operacionales, entre otros.

Una vez que se ha construido el circuito, OrCAD PSpice ofrece diversas opciones de simulación. Los usuarios pueden realizar análisis en el dominio del tiempo para evaluar la respuesta transitoria del circuito, análisis de frecuencia para estudiar su comportamiento en diferentes rangos de frecuencia y análisis de sensibilidad para comprender el impacto de los cambios en los parámetros del circuito.

Además, OrCAD PSpice admite simulaciones avanzadas, como análisis de ruido, análisis de estabilidad, análisis de parámetros y simulación de sistemas mixtos. Estas características permiten a los usuarios realizar análisis detallados y optimizar sus diseños electrónicos.

OrCAD PSpice también permite la integración con herramientas de diseño de PCB (Printed Circuit Board) de OrCAD, lo que facilita la transferencia de diseños desde la etapa de simulación hasta la implementación práctica en una placa de circuito impreso.

En resumen, OrCAD PSpice es un software potente y versátil para la simulación de circuitos electrónicos. Proporciona herramientas completas de diseño y análisis que ayudan a los ingenieros a evaluar y optimizar sus diseños antes de la implementación física, ahorrando tiempo y costos en el proceso de desarrollo de productos electrónicos.

7.3.- NI MULTISIM

NI Multisim es un software de diseño y simulación de circuitos electrónicos que ofrece herramientas específicas para el diseño y análisis de circuitos convertidores. Con una interfaz intuitiva y una amplia biblioteca de componentes, Multisim permite modelar y simular circuitos convertidores, como convertidores de corriente continua a corriente alterna (CC-CA), convertidores de corriente continua a corriente continua (CC-CC) y otros tipos de convertidores utilizados en sistemas de energía y electrónica de potencia. Esto permite a los ingenieros y diseñadores evaluar y optimizar el rendimiento de los circuitos convertidores antes de su implementación física. Este software es utilizado en algunos textos como Rashid [8] y T. L. Floyd [9] que son ampliamente utilizados en docencia. (<https://www.ni.com/es.html>)

Ahora mostraremos un poco del software que Multisim nos proporciona, en la Figura 12 vemos un circuito de un convertidor buck al que le añadimos una señal PWM y

conectaremos un osciloscopio virtual que se encuentra dentro del software para ver las formas de onda de la señal PWM (Figura 13).

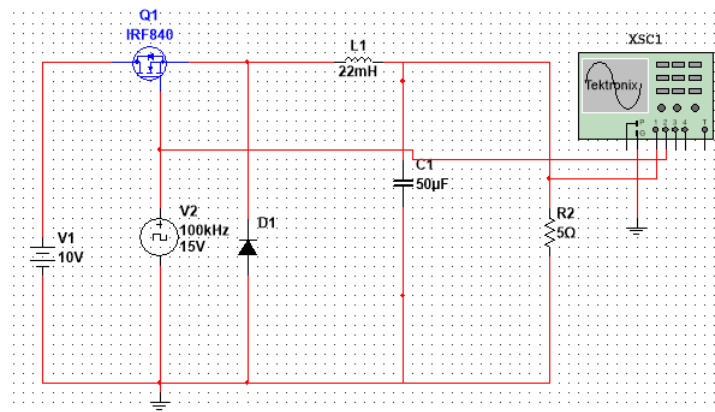


Figura: 12 Circuito de un convertidor Buck simulado en Multisim

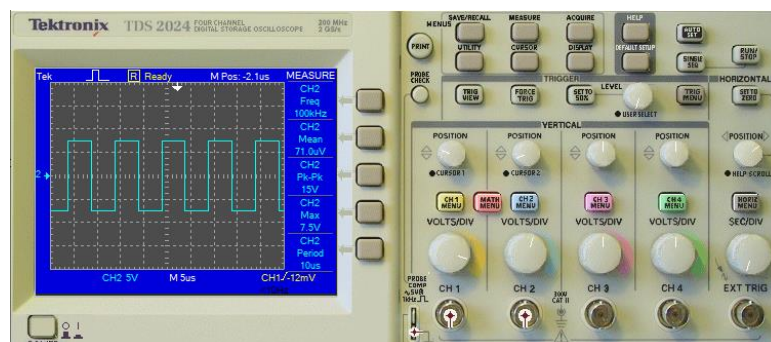


Figura: 13 Señal PWM representada en el Osciloscopio virtual de Multisim

Este software es propiedad de la empresa National Instruments, una de sus grandes características es la posibilidad de incorporar al circuito instrumentación virtual, lo que hace que el proceso de medidas sea muy similar (en cuanto a conexionado y técnicas) a la que podemos hacer en laboratorio. La gran desventaja es que se trata de un software de pago con una licencia gratuita de sólo 7 días. Muy difundido en entornos universitarios. Actualmente cuenta con una versión on-line muy interesante, limitada en cuanto a funciones, pero gratuita y disponible en cualquier navegador. (<https://www.multisim.com/>).

En su versión online hay una infinidad de circuitos ya creados directamente para ser simulados, en el caso de no estar creado el circuito que necesitamos tiene una interfaz bastante intuitiva y una gran cantidad de componentes para implementar el circuito que deseemos, aquí un ejemplo de la versión gratuita de un convertidor Buck (Figura 14) con su respectiva forma de onda (Figura 15) donde se puede ver la corriente, el voltaje y la potencia por la bobina, por lo que podemos ver su ciclo de encendido.

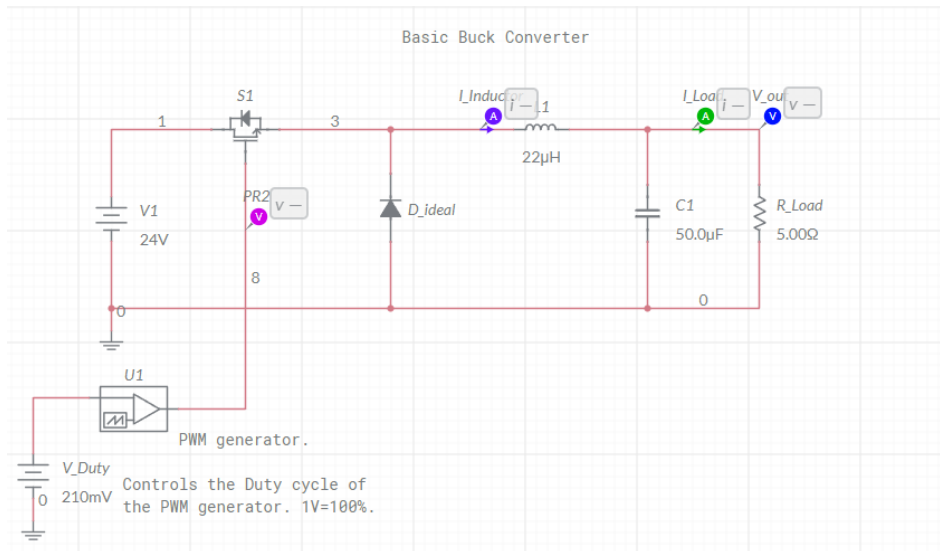


Figura: 14 Ejemplo de convertidor Buck en NI Multisim

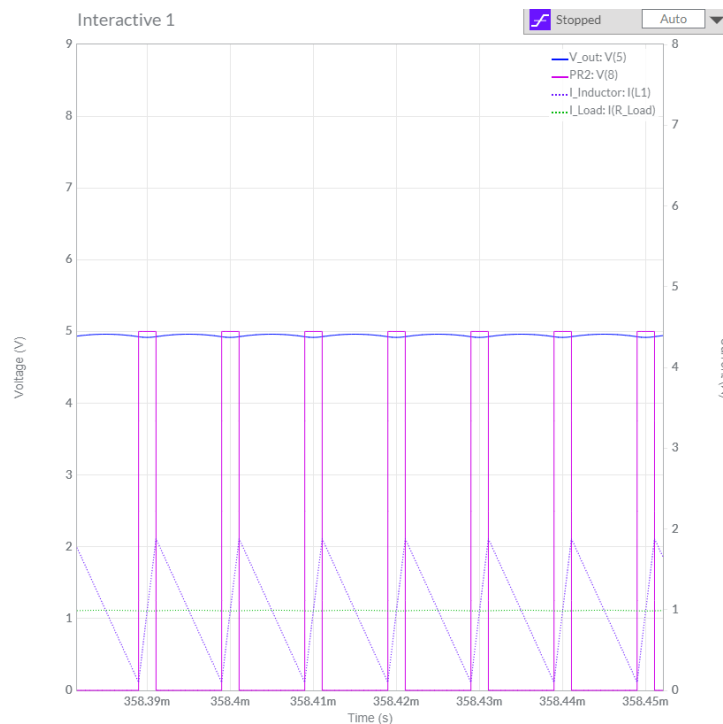


Figura: 15 Simulación de la tensión de salida y corriente por la bobina de un convertidor Buck en NI Multisim

7.4- LTSPICE IV

LTspice IV, versión gratuita de la compañía Linear Technology, ahora parte de Analog Devices Inc. Este es un software de simulación de circuitos electrónicos que se puede utilizar para el diseño y análisis de convertidores de corriente continua a corriente continua (DC-DC). (<https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>)

Este programa tiene un software instalable con una interfaz intuitiva y herramientas avanzadas de simulación, esto permite a los diseñadores modelar y simular eficientemente una amplia variedad de topologías de convertidores, como Buck, Boost, Buck-Boost, convertidores de múltiples niveles, entre otros. LTspice IV ofrece una biblioteca completa de componentes y modelos de dispositivos, lo que facilita la evaluación y optimización del rendimiento de los convertidores DC-DC antes de su implementación física, debajo podemos ver un ejemplo que está dentro del mismo programa, además de ver su forma de onda (Figura 16 y 17).

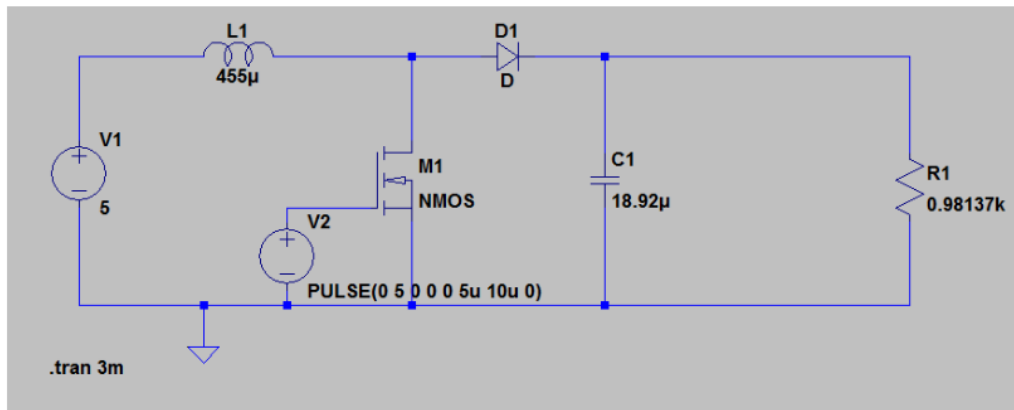


Figura: 16 Diseño de convertidor Buck en LT Spice IV

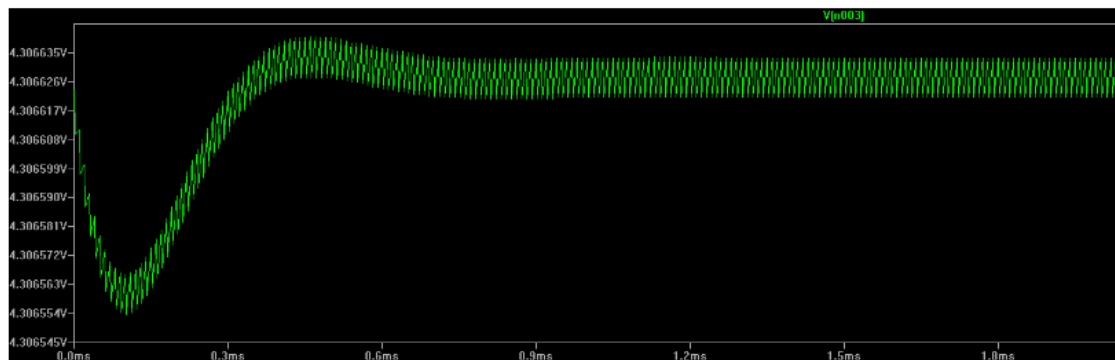


Figura: 17 Forma de onda de la tensión a la salida representada en LT Spice IV

7.5- PSIM8

PSIM 8 es un software de simulación y diseño de sistemas de potencia especializado en convertidores DC-DC que ofrece una versión de prueba gratuita, pero para obtener todo su potencial requiere la compra de una licencia (<https://powersimtech.com/>). Proporciona una amplia variedad de herramientas y modelos específicos para la evaluación y análisis de convertidores DC-DC, incluyendo topologías como Buck, Boost, Buck-Boost, convertidores multinivel y muchos más. Con su interfaz intuitiva, PSIM 8 permite a los diseñadores modelar, simular y optimizar el rendimiento de los convertidores DC-DC, facilitando el desarrollo y la implementación de sistemas de energía eficientes y confiables, además tiene un manual bastante completo.

Dentro del software encontramos una gran cantidad de ejemplos, para nuestro caso se ha escogido un convertidor reductor (Buck) (*Figura 18*), donde podemos ver su amplitud, fase y frecuencia respectivamente (*Figura 19*).

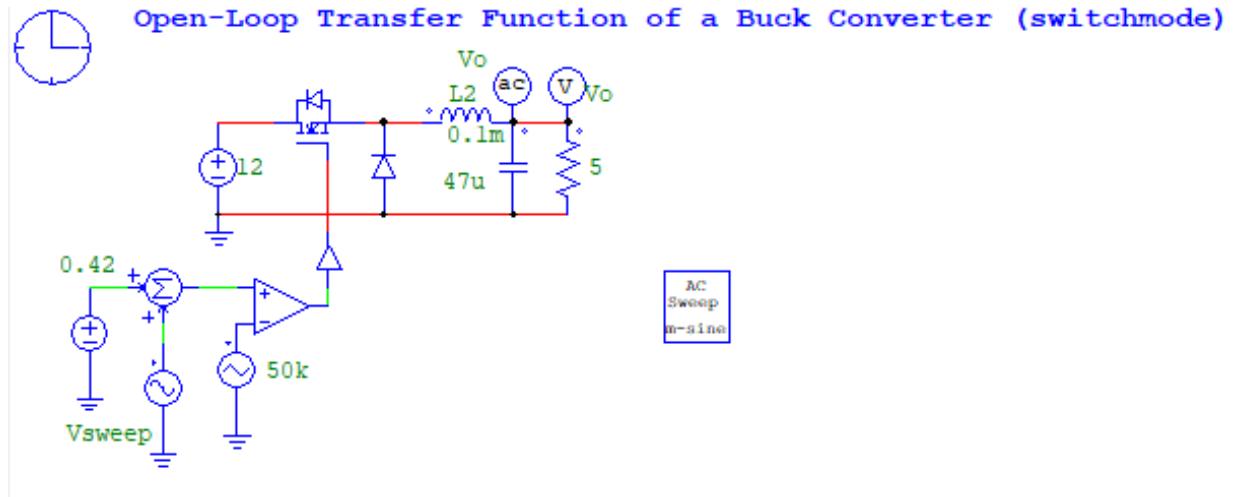


Figura: 18 Ejemplo de convertidor Buck en Psim8

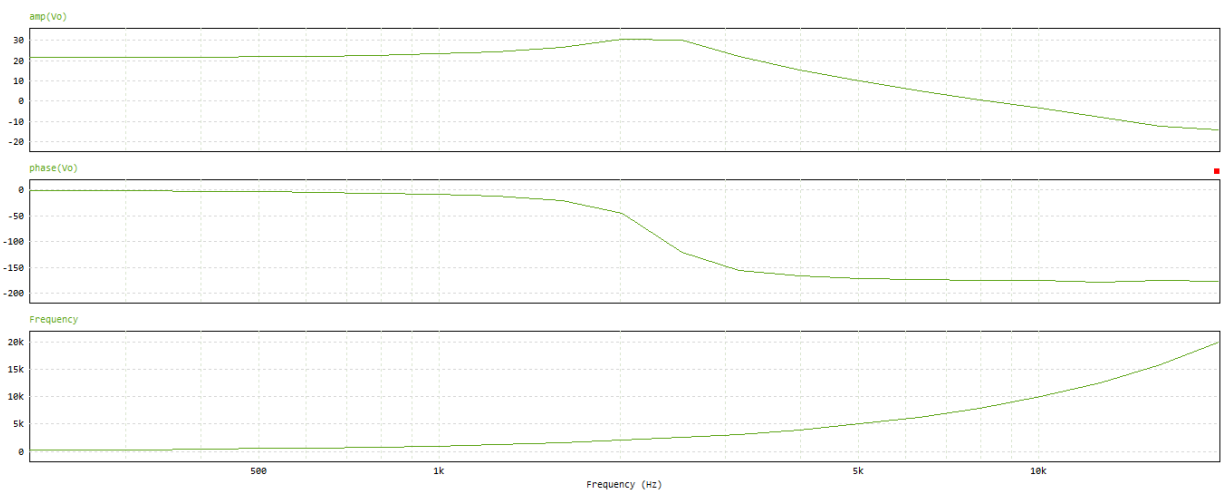


Figura: 19 Simulación de la respuesta frecuencial del convertidor Buck en Psim8

7.6- CASPOC

Caspoc es un software de simulación de circuitos electrónicos desarrollado por Powersim Inc., una empresa con sede en Minnesota, Estados Unidos. Powersim Inc. se especializa en el desarrollo de software de simulación para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la electrónica de potencia, los sistemas de control y otras áreas relacionadas. Caspoc se ha utilizado en la industria, la investigación y la educación para el análisis y diseño de circuitos electrónicos y sistemas de potencia.

Caspoc también es aplicable al análisis y diseño de convertidores DC-DC (enlace <https://www.caspoc.com/>). Con su enfoque multidominio, Caspoc permite a los diseñadores modelar y simular convertidores DC-DC junto con otros componentes y sistemas en un entorno integrado. Ofrece herramientas avanzadas de simulación y análisis para evaluar el rendimiento de los convertidores DC-DC, como eficiencia, estabilidad y respuesta transitoria. Caspoc proporciona un entorno completo para el diseño y la optimización de convertidores DC-DC, ayudando a los ingenieros a lograr sistemas de energía más eficientes y confiables.

Caspoc tiene un software demo instalable gratuito y además una guía de usuario detallada, como podemos ver en la siguiente imagen (Figura 20), para poder aprender paso a paso a realizar el circuito que deseemos.

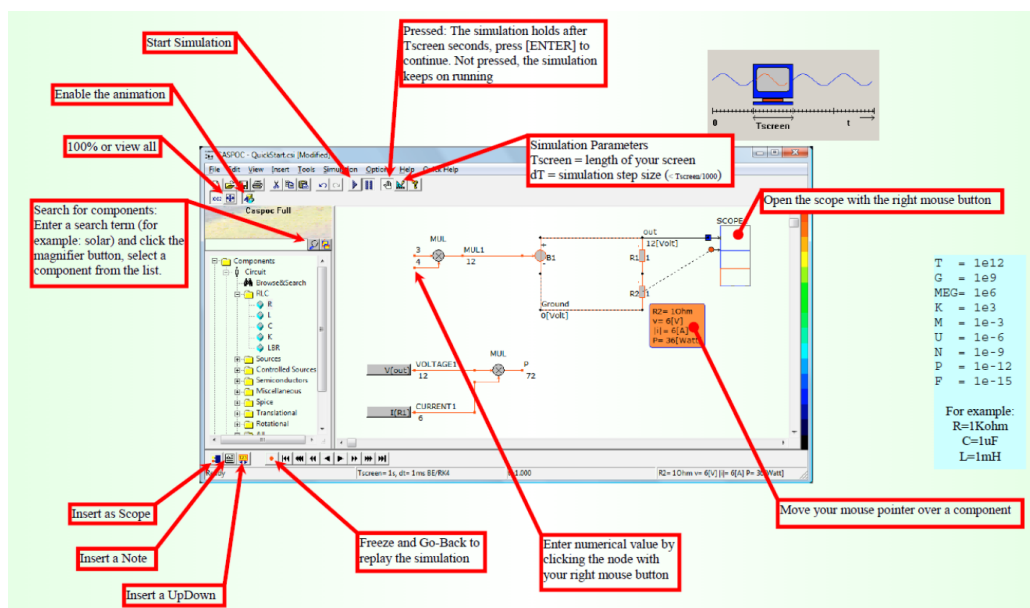


Figura: 20 Página principal de Caspoc

Para nuestro caso en particular nos centramos en convertidores reductores para exponer un ejemplo y ver las funcionalidades del programa, ya que además de su guía detallada contiene múltiples ejemplos, como el siguiente (Figura 21).

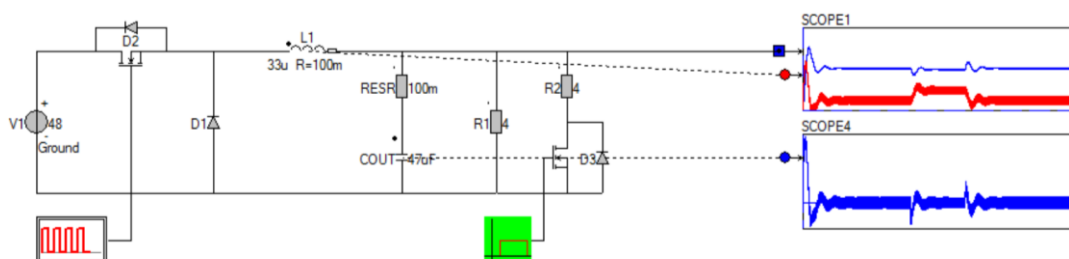


Figura: 21 Ejemplo convertidor Buck en Caspoc

Además, podemos ver las formas de onda que seleccionemos en los scopes (Figura 22 y Figura 23). En este circuito el transistor establece una variación de la resistencia de carga R1// R2 en un instante determinado, estableciéndo así un escalon de corriente para analizar el transitorio de la respuesta del sistema.

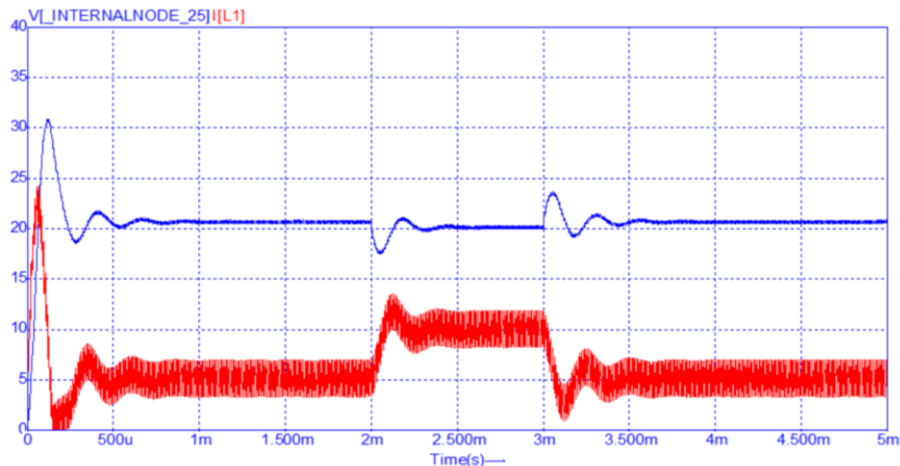


Figura: 22 Scope de la tensión y corriente por la bobina ante un escalon de la corriente de carga simulada en Caspoc

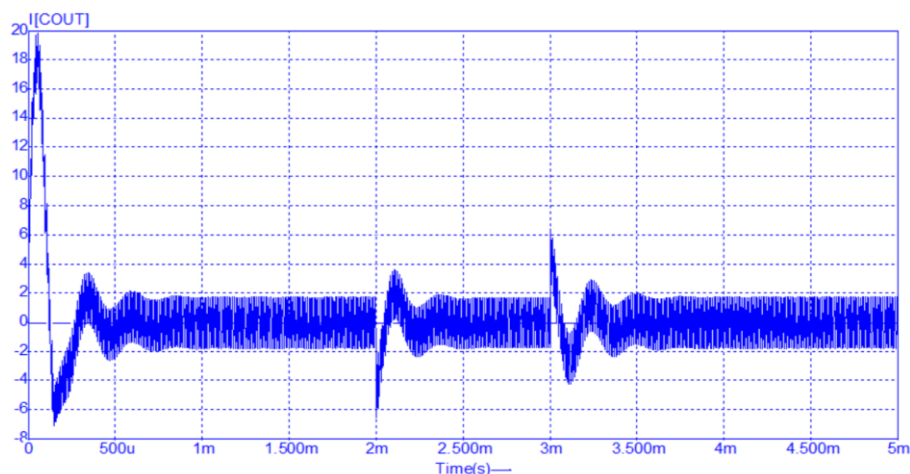


Figura: 23 Scope de la corriente por el condensador simulado en Caspoc

7.7- PLECS

PLECS es un software de simulación especializado en sistemas de energía eléctrica y convertidores electrónicos de potencia. Permite el modelado y simulación precisa de convertidores DC-DC y otros dispositivos electrónicos de potencia. PLECS ofrece una amplia biblioteca de componentes y modelos específicos para el análisis y diseño de sistemas de energía, lo que facilita la evaluación del rendimiento, eficiencia y estabilidad de los convertidores DC-DC. Es ampliamente utilizado por ingenieros y diseñadores en la industria para el desarrollo y optimización de sistemas de energía eficientes y confiables.

PLECS cuenta con un software instalable en su versión demo en la cual contiene ejemplos de convertidores, simulándolos podemos obtener las formas de onda y ver el comportamiento de los circuitos, además de poder realizar nuestros propios circuitos, aunque con ciertas limitaciones ya que solo disponemos de la versión demo, en nuestro caso cogeremos circuitos centrados en los convertidores (Figura 24), que mostrará su forma de onda en los puntos escogidos con el scope (Corriente por la bobina y tensión en la salida) (Figura 25).

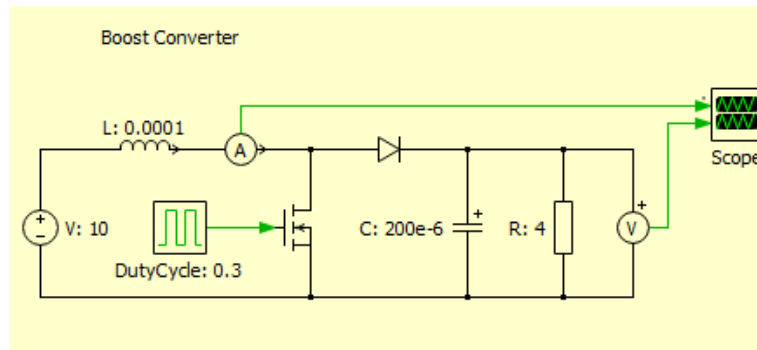


Figura: 24 Ejemplo convertidor Boost en Plecs

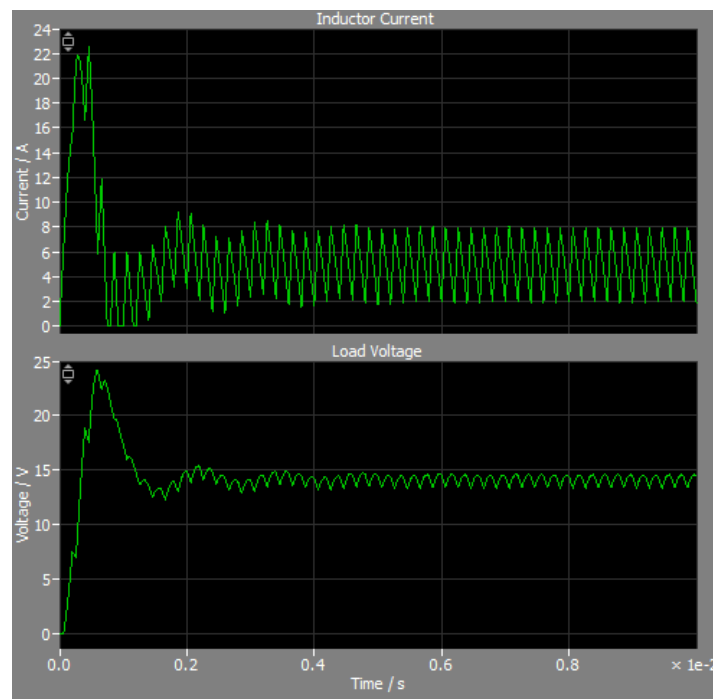


Figura: 25 Simulación de la corriente por la bobina y la tensión en la carga del convertidor Boost en Plecs

7.8- SIMETRIX

Simetrix es un software de simulación de circuitos electrónicos que se centra en el análisis de circuitos analógicos y mixtos. Ofrece una variedad de herramientas y características diseñadas para ayudar a los diseñadores de circuitos a modelar y simular sistemas electrónicos con precisión. Algunas de las características clave de Simetrix incluyen:

1. **Simulación de Circuitos Analógicos:** Simetrix es especialmente conocido por su capacidad para simular circuitos analógicos con alta precisión. Puede manejar

una variedad de componentes analógicos, incluidos amplificadores operacionales, transistores bipolares y MOSFETs, así como componentes pasivos.

2. **Simulación Mixta:** Además de la simulación de circuitos analógicos, Simetrix también admite la simulación de circuitos mixtos que combinan componentes analógicos y digitales.
3. **Amplia Gama de Modelos de Dispositivos:** El software incluye una amplia gama de modelos de dispositivos, lo que permite una simulación más precisa y realista de circuitos. Esto es esencial para el diseño de circuitos de alta calidad.
4. **Análisis de Parámetros:** Simetrix permite realizar análisis de parámetros para evaluar cómo cambia el rendimiento del circuito en función de diferentes variables, como componentes, valores y condiciones.
5. **Análisis de Sensibilidad:** Puedes realizar análisis de sensibilidad para determinar cómo pequeñas variaciones en los valores de los componentes afectan el rendimiento general del circuito.
6. **Análisis de Ruido:** Simetrix también incluye herramientas para analizar y simular el ruido en circuitos, lo que es importante para diseñar sistemas de alta calidad en aplicaciones sensibles al ruido.
7. **Opciones de Análisis de Frecuencia:** El software permite análisis en el dominio de la frecuencia, lo que es fundamental para el diseño de circuitos de radiofrecuencia y otros sistemas de alta frecuencia.
8. **Interfaz Gráfica Intuitiva:** Simetrix presenta una interfaz gráfica intuitiva que facilita la construcción y simulación de circuitos. También permite la visualización de resultados de simulación de manera clara.
9. **Integración con Modelado de Parámetros SPICE:** Simetrix es compatible con el formato SPICE, lo que significa que puedes aprovechar los modelos SPICE existentes en tus simulaciones.
10. **Educación y Formación:** Simetrix es utilizado tanto por profesionales como por educadores y estudiantes para aprender sobre el diseño y la simulación de circuitos electrónicos.

A continuación, se ve un ejemplo (Figura 26) de una simulación de un convertidor Buck en Simetrix y su respectiva simulación (Figura 27).

Este es un programa muy avanzado que puede resultar complejo para el alumnado debido a la variedad de grados de los que provienen estos, por lo que no se recomienda para el uso dentro de las prácticas.

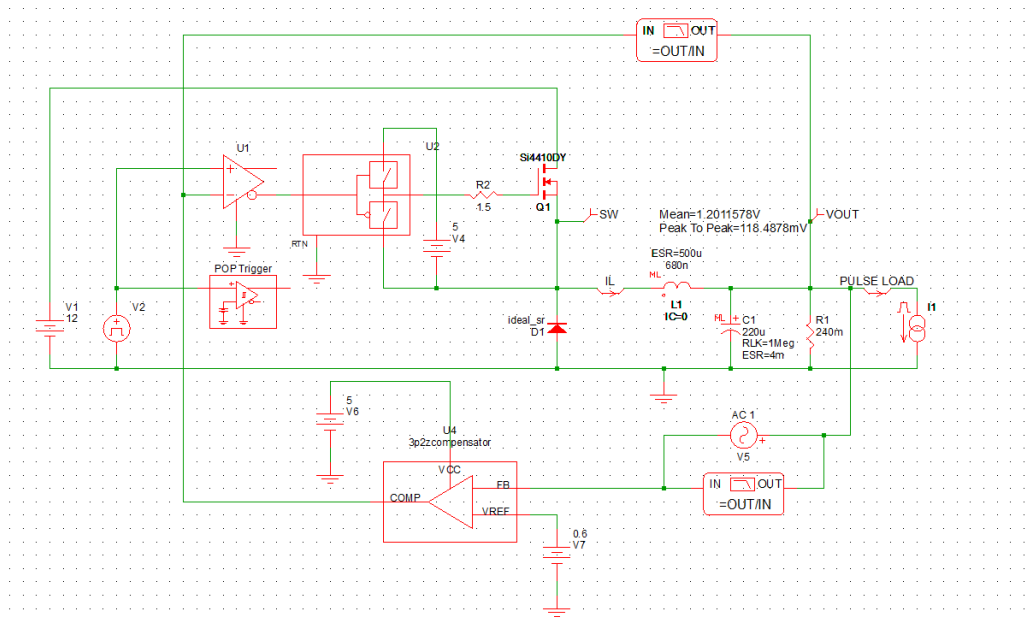


Figura: 26 Ejemplo convertidor Buck en Simetrix

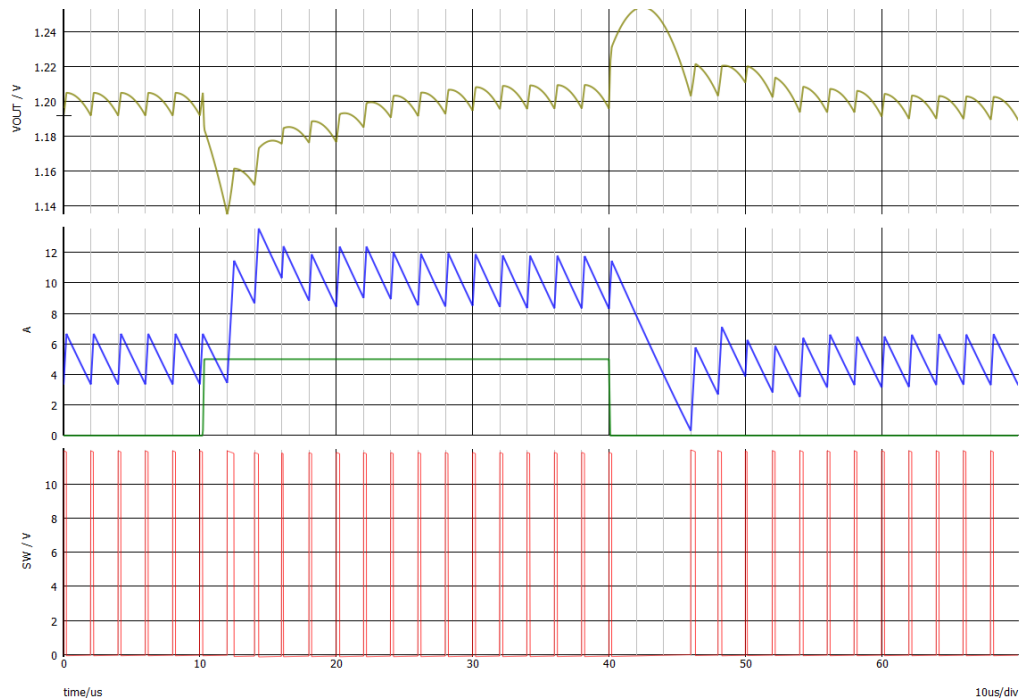


Figura: 27 Simulación de la tensión corriente y potencia a la salida del convertidor Buck en Simetrix

7.9- RESUMEN Y CONCLUSIÓN DE SOFTWARES DE SIMULACIÓN

Ahora vamos a realizar un pequeño resumen con los detalles más destacables de cada software.

MATLAB Simulink:

- Utiliza bloques funcionales para representar componentes electrónicos.

- Ofrece simulaciones en dominio de tiempo, análisis de frecuencia y más.
- Permite la incorporación de código MATLAB y la interacción en tiempo real.
- Potente para diseñar y simular circuitos electrónicos.

OrCAD PSpice:

- Interfaz gráfica intuitiva para construir circuitos.
- Simulaciones en dominio de tiempo, análisis de frecuencia y sensibilidad.
- Compatible con análisis avanzados como ruido y estabilidad.
- Integración con herramientas de diseño de PCB.

NI Multisim:

- Interfaz intuitiva y biblioteca de componentes.
- Modelado y simulación de circuitos convertidores.
- Incluye ejemplos predefinidos y personalización de circuitos.
- Múltiples herramientas de análisis y forma de onda.

LTspice IV:

- Simulación de convertidores DC-DC y otras topologías.
- Biblioteca completa de componentes y modelos.
- Simulaciones avanzadas y análisis detallados.
- Enfoque en precisión y eficiencia en el diseño.

PSIM 8:

- Enfocado en el diseño y análisis de sistemas de potencia y convertidores DC-DC.
- Amplia variedad de herramientas y modelos específicos.
- Facilita la evaluación y optimización del rendimiento.
- Desarrollo de sistemas de energía eficientes.

Caspoc:

- Simulación y diseño multidisciplinario.
- Modelado y simulación de convertidores junto con otros componentes.
- Análisis de rendimiento, estabilidad y respuesta transitoria.
- Diseño y optimización de convertidores DC-DC.

PLECS:

- Simulación precisa de sistemas de energía y convertidores electrónicos.
- Biblioteca de componentes y modelos específicos.
- Análisis detallados de rendimiento, eficiencia y estabilidad.
- Ampliamente utilizado en la industria para sistemas de energía.

SIMetrix:

- Enfoque en análisis de circuitos analógicos y mixtos.
- Amplia gama de modelos de dispositivos.
- Análisis de parámetros, sensibilidad y ruido.
- Interfaz gráfica intuitiva y visualización de resultados.

En la tabla 1 se puede ver el resumen de lo más destacado de cada software.

Software	Enfoque Principal	Características Destacadas	Aplicaciones Principales
MATLAB SIMULINK	Simulación de sistemas	Modelado versátil, simulación de sistemas dinámicos complejos	Ingeniería, ciencias aplicadas, control de sistemas
ORCAD PSPICE	Diseño de PCB y simulación	Diseño de PCB, análisis de circuitos a nivel de sistema	Diseño electrónico, desarrollo de hardware
NI MULTISIM	Simulación interactiva	Facilidad de uso, simulación interactiva de circuitos	Educación en electrónica, prototipado virtual
LTSPICE IV	Simulación de circuitos	Simulación de circuitos analógicos de alta calidad	Circuitos analógicos, diseño de componentes
PSIM8	Sistemas de potencia	Simulación y diseño de convertidores y sistemas de control	Electrónica de potencia, sistemas de control
CASPOC	Control y electrónica de potencia	Simulación de sistemas de control y electrónica de potencia	Convertidores de energía, sistemas de control
PLECS	Sistemas de control y potencia	Modelado de sistemas de energía y electrónica de potencia	Sistemas de energía, simulación de convertidores
SIMETRIX	Simulación de circuitos	Precisión y eficiencia en simulación de circuitos analógicos	Circuitos analógicos y mixtos

Tabla 1: Resumen de softwares de simulación

Una vez vistos los puntos fuertes de cada software se recomendará el software al que se ha llegado a la conclusión que es el que mejor se adapta a la hora de apoyar los conocimientos impartidos en la asignatura y porque es el más aconsejable.

Este será, OrCAD PSpice que destaca en el entorno académico de ingeniería electrónica debido a su larga historia de uso y familiaridad entre los estudiantes. La amplia disponibilidad de recursos de aprendizaje, su aplicabilidad en la industria y la flexibilidad y funcionalidad que ofrece son razones clave por las cuales este software es una opción sólida para impartir prácticas y enseñar conceptos relacionados con el diseño y la simulación de circuitos electrónicos.

8.- ESTUDIO Y COMPARACION DE LAS DIFERENTES HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ONLINE QUE OFRECEN LOS FABRICANTES

En este apartado se realizará una breve descripción de las herramientas de simulación online encontrados, que nos podrían ayudar a reforzar los conocimientos obtenidos en la asignatura. Además, haremos una comparativa entre estos, para ver los pros y contras que podríamos tener para optimizar el tiempo y obtener los mayores conocimientos posibles.

La disponibilidad de herramientas de simulación en línea fáciles de utilizar, ofrecidas por la mayoría de los fabricantes y distribuidores de dispositivos semiconductores de potencia, representa un avance significativo en la educación y la aplicación de la electrónica de potencia. Estas herramientas brindan una serie de beneficios tanto para estudiantes como para la industria. A continuación, exploraremos estos beneficios en detalle.

En primer lugar, la simulación en línea facilita el proceso de aprendizaje y comprensión de la electrónica de potencia. Los circuitos de potencia a menudo involucran componentes complejos y cálculos teóricos que pueden resultar desafiantes para los estudiantes. Con estas herramientas, los alumnos pueden aplicar la teoría directamente a través de la simulación de circuitos. Esto les permite experimentar con diferentes configuraciones y parámetros sin la necesidad de montar físicamente un circuito, lo que ahorra tiempo y recursos.

En segundo lugar, estas herramientas de simulación en línea actúan como un puente entre la teoría académica y la industria de dispositivos semiconductores de potencia. Los fabricantes y distribuidores ofrecen modelos precisos de sus componentes, lo que permite a los estudiantes trabajar con componentes reales utilizados en la industria. Esto no solo acerca a los alumnos a la aplicación práctica de la electrónica de potencia, sino que también les familiariza con productos específicos y hojas de datos (datasheets) de fabricantes reales.

En resumen, la disponibilidad de herramientas de simulación en línea ofrecidas por fabricantes y distribuidores de dispositivos semiconductores de potencia beneficia tanto a los estudiantes como a la industria. Además, conecta a los estudiantes con la industria al brindar acceso a modelos precisos de componentes y datasheets de fabricantes reales. Esta sinergia entre la academia y la industria es esencial para la formación de profesionales capacitados y preparados para abordar los desafíos de la electrónica de potencia en el mundo real.

Un software de simulación online para fabricantes de circuitos integrados DC-DC es una herramienta poderosa en el diseño y desarrollo de estos circuitos. La tecnología DC-DC es crucial en la conversión de corriente continua (DC) de un nivel de voltaje a otro, lo que es fundamental en una amplia gama de dispositivos electrónicos, desde teléfonos móviles hasta sistemas de energía renovable.

Este tipo de software permite a los fabricantes simular y analizar el comportamiento de los circuitos integrados DC-DC en un entorno virtual antes de pasar a la fase de fabricación. Esto tiene múltiples ventajas, como la optimización del diseño, la reducción de costos y tiempos de desarrollo, y la identificación temprana de posibles problemas o mejoras.

La introducción de un software de simulación online en este campo facilita a los ingenieros y diseñadores acceder a herramientas avanzadas de simulación desde cualquier lugar con conexión a internet. Pueden probar diferentes configuraciones, evaluar el rendimiento bajo diversas condiciones y realizar ajustes precisos para obtener circuitos más eficientes y confiables.

Estos softwares suelen ofrecer una variedad de herramientas, como simulación de circuitos, análisis de rendimiento, optimización de parámetros, y en algunos casos, integración con bases de datos de componentes para facilitar la selección de materiales.

En esta línea de investigación se han analizado diferentes softwares realizados por fabricantes en trabajos de fin de grado anteriores como el de Adrián Polo Campos [4], en el que se muestra una visión de las utilidades que estos tienen y realiza una comparativa entre los mismos. En este trabajo revisaremos la actualización de los programas anteriormente analizados y se introducirán nuevos softwares que pueden ser interesantes para el alumnado en un futuro, haciendo una nueva comparativa y exponiendo los más interesantes para su posible uso en las prácticas.

En cuanto a los softwares de simulación on-line de fabricantes tenemos:

- **EdesignSuite de ST Microelectronics:** Es una plataforma de diseño y simulación electrónica que ofrece herramientas para seleccionar productos, simular y optimizar circuitos. Permite a los ingenieros evaluar el rendimiento y comportamiento de los circuitos antes de la implementación física.
https://www.st.com/content/st_com/en/support/resources/edesign.html
- **Webench de Texas Instruments (TI):** Es una herramienta en línea gratuita que permite a los ingenieros diseñar y optimizar sistemas de energía. Proporciona una interfaz intuitiva para seleccionar componentes, simular circuitos y generar diseños completos con especificaciones personalizadas. Ayuda a acelerar el proceso de diseño y a optimizar el rendimiento de los sistemas de energía.
<https://webench.ti.com/power-designer/>
- **EE-Sim Design Tools de Maxim Integrated:** Es una plataforma de diseño en línea que ofrece herramientas para diseñar y simular circuitos electrónicos. Permite a los ingenieros seleccionar componentes, simular el rendimiento del circuito y generar diseños personalizados. Esta herramienta acelera el proceso de diseño y ayuda a optimizar el rendimiento de los circuitos electrónicos.
<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ee-sim.html>
- **ON Semiconductor:** Esta empresa ha desarrollado una herramienta llamada "Power Supply WebDesigner" (PSWD) para diseñar y simular convertidores de potencia, que facilita la selección de componentes y la simulación del rendimiento del convertidor, simplificando el proceso de diseño para aplicaciones diversas.
<https://www.onsemi.com/>

- **LTPowerCAD II:** es una herramienta de diseño de circuitos desarrollada por Analog Devices, diseñada para ayudar a los ingenieros en la selección, diseño y simulación de sistemas de suministro de energía lineal. Permite seleccionar componentes, crear diseños personalizados, simular el comportamiento de los circuitos y optimizar el rendimiento de manera eficiente.
<https://www.analog.com/en/lp/ltpowercad.html>
- **Semisel:** es un programa online creado por la empresa Semikron que permite hallar las pérdidas de los diferentes dispositivos de esta casa. El programa se encuentra en la página principal de Semikron en un apartado llamado “Semisel Simulation”.
<https://www.semikron-danfoss.com/service-support/semisel-simulation.html>

Después de esta breve introducción a los simuladores en línea proporcionados por los fabricantes, vamos a profundizar en cada uno de ellos. Examinaremos sus características destacadas y realizaremos un ejemplo de cada uno para comprender mejor cómo funcionan estas herramientas. Finalmente, compararemos estos programas para determinar cuál es el más adecuado para el alumnado.

8.1- EDESING SUITE DE ST MICROELECTRONICS

La herramienta eDesignSuite es una plataforma en línea proporcionada por STMicroelectronics, un fabricante de semiconductores, que ofrece una variedad de herramientas de diseño y simulación para ingenieros y diseñadores de sistemas electrónicos. Esta plataforma ayuda en el diseño de productos utilizando componentes de STMicroelectronics, ofreciendo una serie de herramientas integradas para facilitar el proceso de desarrollo. Algunas de las herramientas y características que ofrece eDesignSuite son:

1. **Selector de Productos:** Permite a los usuarios encontrar y seleccionar los productos de STMicroelectronics que mejor se adaptan a sus necesidades, como microcontroladores, sensores, amplificadores, entre otros.
2. **Simuladores y Herramientas de Diseño:** Incluye herramientas de simulación que permiten a los diseñadores evaluar el rendimiento de los productos en diferentes condiciones y configuraciones. Esto puede incluir simulaciones de circuitos, cálculos de eficiencia energética, análisis térmico, etc.
3. **Asistentes de Diseño y Evaluación:** Proporciona guías paso a paso para ayudar en el diseño y la evaluación de sistemas específicos, facilitando el proceso de implementación de productos basados en componentes de STMicroelectronics.
4. **Documentación Técnica:** Ofrece acceso a documentación técnica detallada, incluyendo hojas de datos, notas de aplicación, manuales de usuario y otra información relevante sobre los productos de STMicroelectronics.

5. **Soporte Técnico:** La plataforma también proporciona acceso a recursos de soporte técnico, foros de discusión y otras formas de asistencia para los usuarios que trabajan en proyectos que involucran productos de STMicroelectronics.

Una de las principales ventajas de edesignSuite es su interfaz intuitiva y fácil de usar, que permite a los usuarios diseñar y simular circuitos DC-DC de manera eficiente. Ofrece una amplia gama de modelos y componentes de ST Microelectronics, lo que facilita la selección y configuración de los dispositivos adecuados para cada aplicación.

edesignSuite también proporciona herramientas de simulación avanzadas que permiten a los diseñadores evaluar el rendimiento y la eficiencia de los circuitos DC-DC. Los usuarios pueden realizar análisis de respuesta en frecuencia, análisis transitorio y análisis de estabilidad para optimizar el diseño y garantizar un funcionamiento óptimo del convertidor.

Además, la suite ofrece la posibilidad de realizar simulaciones de diferentes topologías de convertidores, como Buck, Boost, Buck-Boost, entre otros. Esto permite a los diseñadores explorar diversas configuraciones y encontrar la solución más adecuada para sus necesidades específicas.

Otra ventaja significativa de edesignSuite es que proporciona una amplia biblioteca de documentación técnica, notas de aplicación y ejemplos de diseño. Esto permite a los usuarios acceder a recursos adicionales y aprender mejores prácticas de diseño de circuitos DC-DC.

Proseguiremos con un ejemplo de uso de la herramienta y como se hará paso a paso un circuito convertidor Buck-Boost. Para ello accederemos a la herramienta “eDesignSuite Tool”.

https://www.st.com/content/st_com/en/support/resources/edesign.html

Para desarrollar un diseño y explorar sus capacidades con el fin de comprender mejor su utilidad y las posibilidades que ofrece. Para este diseño comenzaremos seleccionando el apartado “Tools & software” para después seleccionar el diseñador del fabricante “eDesignSuite” una vez dentro de la herramienta nos enfocaremos en el apartado “Power Supply Design Tool” y seleccionaremos el tipo DC/DC (Figura 28) de entre los tipos que nos ofrecen para centrarnos en los convertidores DC/DC. También está la posibilidad de hacer diseños con leds, pero para el ejemplo utilizaremos la herramienta orientada a las fuentes de alimentación.

eDesignSuite

eDesignSuite is a comprehensive set of easy-to-use design-aid utilities ready to help you streamline the system development process with a wide range of ST products.

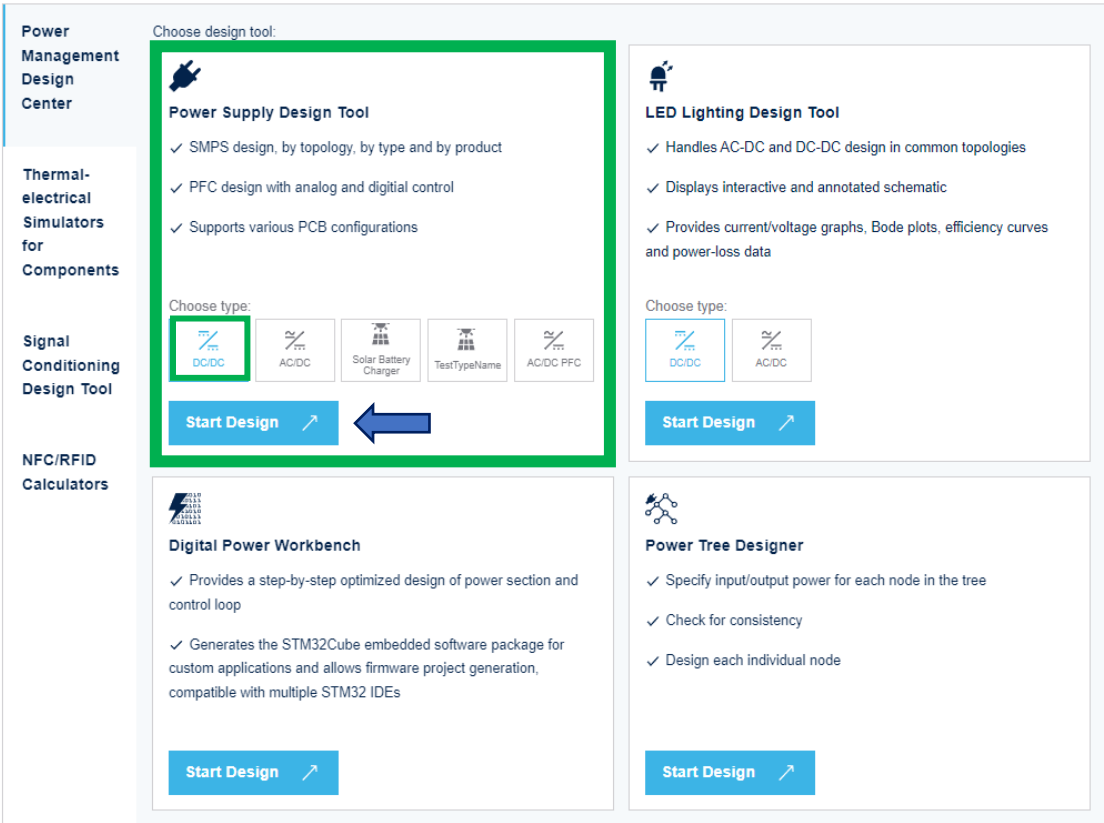


Figura: 28 Página principal de la herramienta eDesingSuite

Una vez dentro de la herramienta se elegirá el tipo de convertidor que se quiere diseñar, para ello hay que introducir las especificaciones de entrada y salida para que permita realizar el diseño. En este ejemplo las especificaciones de voltaje de entrada estarán entre 6V y 30V y las de salida serán 8V y 1A (Figura 29).

The image shows a 'Especificaciones' (Specifications) form within the eDesignTool. It has a 'Restablecer Todo' (Reset All) link in the top right. The form is divided into two main sections: 'Entrada (Voltaje)' (Input Voltage) and 'Salida' (Output). The 'Entrada' section has input fields for 'Min V' (set to 6) and 'Max V' (set to 30). The 'Salida' section has input fields for 'Voltaje' (set to 8) and 'Corriente' (set to 1). Below these fields is a blue button labeled 'AÑADIR SALIDA' (Add Output). At the bottom, the 'Potencia de Salida' (Output Power) is displayed as '8 W'.

Figura: 29 Especificaciones del diseño en eDesignTool

En este ejemplo se analizará el convertidor A7986A Buck-Boost el cual se puede ver en la (Figura 30) donde aparecen sus voltajes de entrada y salida, las frecuencias de oscilación y sincronización y el tipo de encapsulado. También se puede acceder al datasheet del producto para ver las especificaciones y comprobar si es apto para nuestro diseño.



Figura: 30 Convertidor A7986A en eDesignSuite

Una vez dentro de la herramienta para diseñar hay una gran cantidad de opciones para empezar nuestro diseño. Anteriormente se han introducido los valores de entrada y salida al conversor, pero también está la opción de modificarlos dentro (Figura 31), una vez modificados los valores de entrada y salida, también variarán los valores de las resistencias, condensadores y bobinas. Además de los valores de entrada y salida también es posible cambiar diodos y mosfets dentro de nuestro circuito.

OPERATING CONDITIONS	DC/DC CONVERTER SPECIFICATIONS
from 6 to 30 V	IC: A7986A
@Vin: 30 V	Topology: POSITIVE BUCK-BOOST
from 6 to 700 mA	Input: 6 - 30 V
@Iout: 0,7 A	Output: 10 V (2 % ripple) - 700 mA max
from -40 to 125 °C	CHANGE SPECIFICATIONS
@Ta: 25 °C	

Figura: 31 Valores de diseño para nuestro convertidor en eDesignSuite

Por otra parte, la herramienta tiene diferentes gráficas, en la primera (Figura 32) se puede ver el ciclo de trabajo y los voltajes e intensidades en el circuito, estos varían según los valores de entrada y salida que se seleccionen en el apartado anterior.

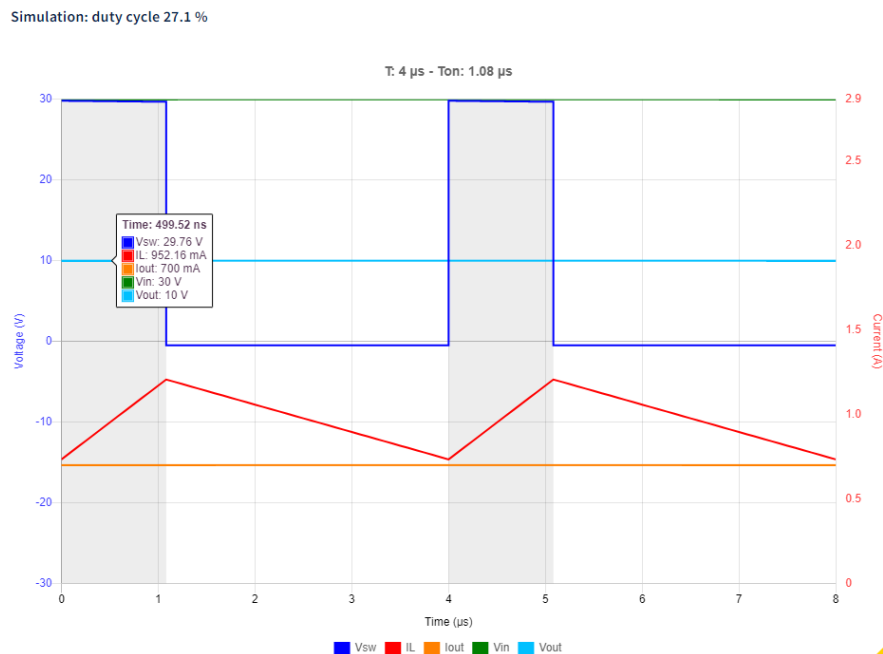


Figura: 32 Duty cycle, corriente por la bobina y tensión de entrada y salida del circuito representado en eDesignSuite

Además, se destaca la gráfica de la eficiencia (Figura 33) dentro de la herramienta, la cual muestra los valores máximos y mínimos para las condiciones deseadas.

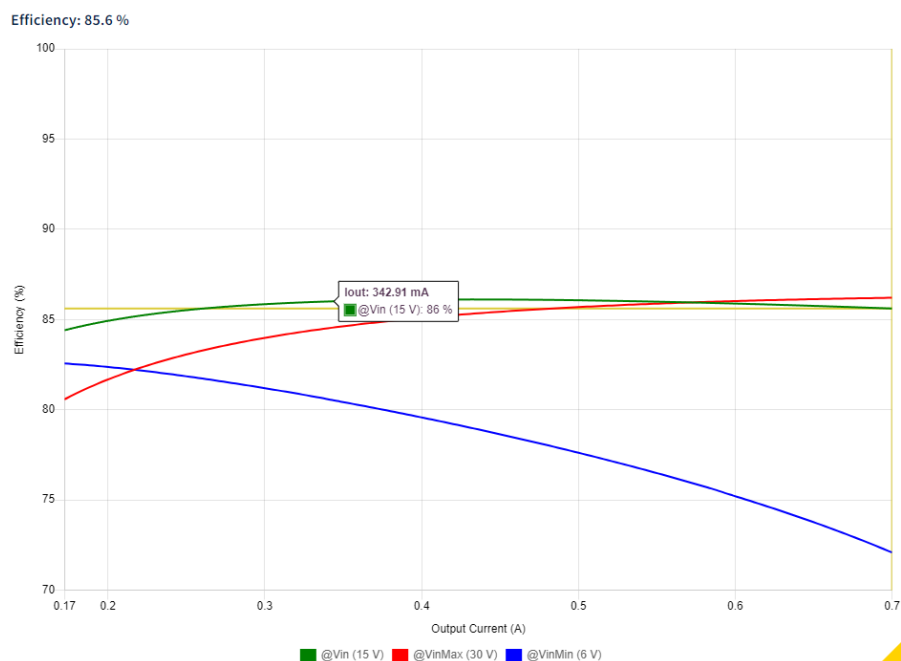


Figura: 33 Eficiencia para tensión mínima, máxima e intermedia del circuito representada en eDesignSuite

Por último, destacaremos de esta herramienta la representación de las pérdidas en los distintos elementos del circuito (Figura 34).



Figura: 34 Eficiencia y pérdidas de potencia dentro del circuito representadas en eDesignSuite

En resumen, edesignSuite de ST Microelectronics es una herramienta poderosa y completa para el diseño y simulación de circuitos DC-DC. Sus ventajas incluyen una interfaz intuitiva, amplia selección de componentes, herramientas de simulación avanzadas y recursos de aprendizaje. Con esta suite, los ingenieros y diseñadores pueden optimizar sus diseños, mejorar la eficiencia energética y acelerar el proceso de desarrollo de productos.

8.2- WEBENCH TEXAS INSTRUMENT

WEBENCH es una herramienta basada en web ofrecida por Texas Instruments (TI), una destacada empresa de semiconductores, que ayuda a ingenieros y diseñadores a seleccionar, analizar y optimizar componentes electrónicos para sus diseños. La herramienta se enfoca principalmente en diseñar circuitos de suministro de energía, pero se ha expandido para incluir otras áreas como amplificadores, convertidores de datos y más.

Así es como funciona en general la herramienta WEBENCH:

1. **Selección de Componentes:** Los usuarios ingresan los requisitos de su diseño, como voltaje de entrada/salida, corriente de carga, eficiencia y otras especificaciones. Con base en esta información, la herramienta sugiere componentes adecuados del catálogo de Texas Instruments.
2. **Configuración del Diseño:** Una vez seleccionados los componentes, la herramienta genera un diseño de circuito completo junto con diagramas

esquemáticos, listas de materiales (BOM) y otros detalles de diseño. También proporciona diferentes opciones de diseño para una mayor personalización.

3. **Simulación:** Los ingenieros pueden simular el diseño utilizando varios parámetros y condiciones para comprender cómo se comportará el circuito en diferentes escenarios. Esto ayuda a identificar posibles problemas y a optimizar el diseño.
4. **Optimización:** WEBENCH permite a los usuarios experimentar con diferentes valores de componentes, configuraciones y parámetros para optimizar el diseño según sus requisitos específicos. Esto puede llevar a un rendimiento mejorado, mayor eficiencia y otras características deseadas.
5. **Análisis de Rendimiento:** La herramienta proporciona métricas de rendimiento detalladas, como eficiencia, rendimiento térmico y otros parámetros relevantes, lo que permite a los ingenieros tomar decisiones informadas sobre el diseño.
6. **Generación de Informes y Documentación:** Una vez satisfechos con el diseño, los usuarios pueden generar informes que incluyen esquemas, listas de materiales y resultados de simulación. Estos informes son útiles para la documentación del diseño y la colaboración.

A continuación, se realizará un circuito de ejemplo para demostrar el funcionamiento del programa y ver las características y la posibilidad de uso para los alumnos (<https://webench.ti.com/power-designer/>).

Para ello se empezará introduciendo las especificaciones de tensión e intensidad deseadas, además de poder elegir las consideraciones del diseño, para que el circuito esté balanceado, sea de bajo coste, tenga una mayor eficiencia o sea un circuito más compacto (Figura 35)

The screenshot displays the TI Webench Power Designer configuration interface. It is divided into three main sections: Input, Output, and Design Consideration. The Input section includes a 'Supply type is' dropdown set to 'DC', and two input fields for 'Vin Min' (14 V) and 'Vin Max' (22 V). The Output section shows 'Vout' (3.3 V) and 'Iout Max' (2 A), with an 'Isolated Output' toggle switch. The Design Consideration section has a dropdown 'I want my design to be' with options 'Balanced', 'Low Cost', 'High Efficiency', and 'Small Footprint'. A red 'VIEW DESIGNS' button is located at the bottom left of the interface.

Figura: 35 Especificaciones de diseño en Webench

Una vez elegidos los valores de tensión y corriente se proseguirá eligiendo el circuito que más interese (Figura 36), en este caso utilizaremos el convertidor TPS56330, para realizar la elección es posible realizar comparativas entre los convertidores (Figura 37) para ver cual se adapta más a las necesidades del diseño.

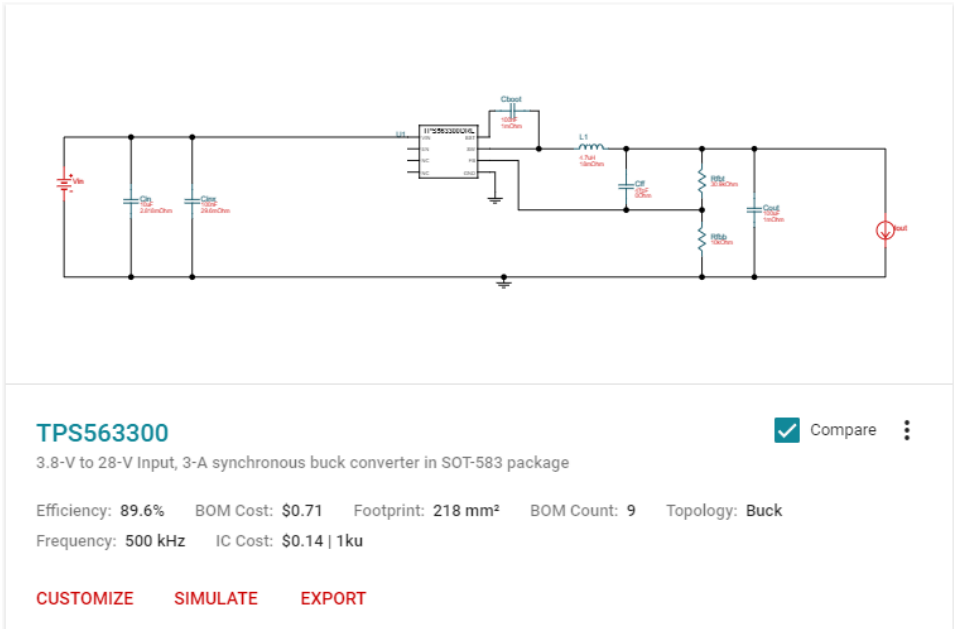


Figura: 36 Circuito de ejemplo en Webench

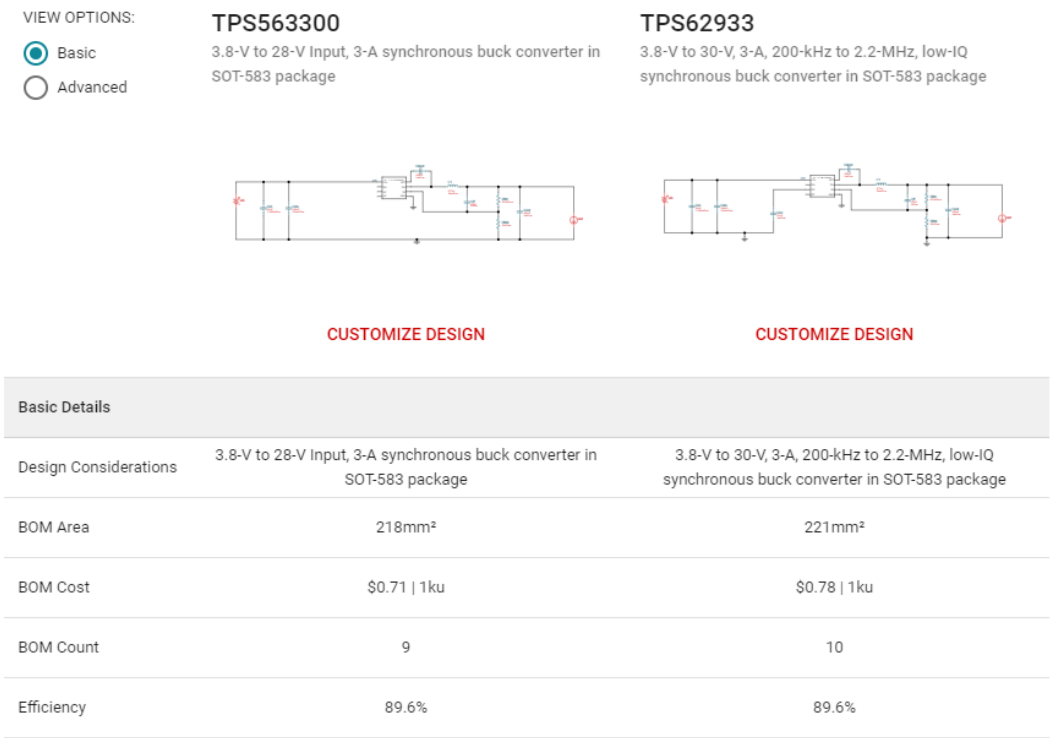


Figura: 37 Comparativa de circuitos en Webench

Una vez elegido el convertidor se entrará el apartado de simulaciones, donde se podrá elegir qué tipo de simulación se quiere realizar (Figura 38).

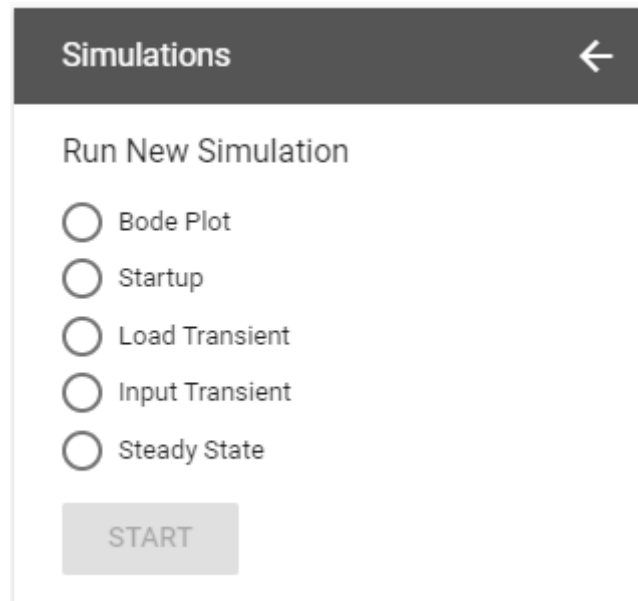


Figura: 38 Simulaciones posibles en Webench

Una vez elegido el tipo de simulación que se quiere representar, el programa realizará la carga de la gráfica (Figura 39), la cual puede tardar en cargar unos minutos, además debajo de la gráfica nos saldrán valores destacables de tensiones y corrientes (Figura 40).

Waveforms



ADD WAVEFORMS

☐ Show Marker

Zoom-In: Click and drag, Zoom-Out: Click zoom out icon

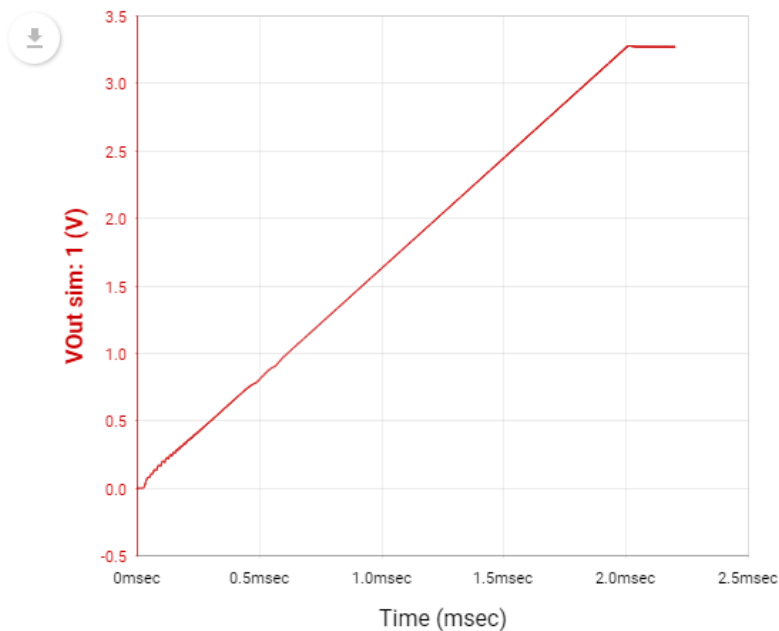


Figura: 39 Ejemplo de forma de onda para la tensión de salida al encender el convertidor TPS563300 en Webench

Performance Summary



Sim ID	Startup Time	Vout Average	Inductor Max Current
1	1.83 ms	3.27 V	2.69 A

Figura: 40 Datos destacados en Webench

Por último, destacamos las gráficas del ciclo de trabajo y la eficiencia (Figura 41 y 42), además del diagrama de bode, el resumen de los materiales utilizados (BOM) y los valores de operación dentro del circuito.

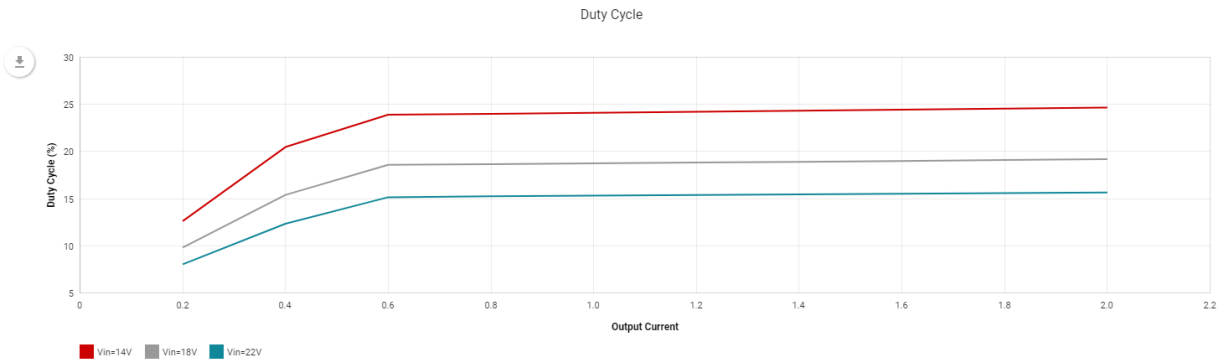


Figura: 41 Gráfica del ciclo de trabajo en función de la tensión de entrada del convertidor TPS563300 representada en Webench

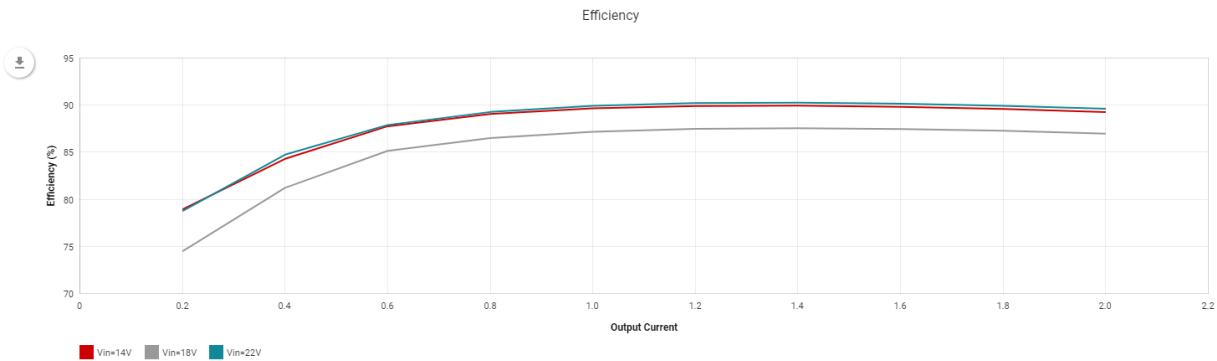


Figura: 42 Gráfica de la eficiencia en función de la tensión de entrada del convertidor TPS563300 representada en Webench

En resumen, WEBENCH simplifica el proceso de diseño al proporcionar una plataforma integrada para la selección de componentes, el diseño de circuitos, la simulación y la optimización. Ayuda a los ingenieros a ahorrar tiempo y esfuerzo en la fase de diseño y garantiza que sus diseños cumplan con las especificaciones deseadas.

La explicación del uso de este software de simulación online viene de manera bastante detallada explicada en los anteriores trabajos de fin de grado por lo que no explicaremos su funcionamiento.

8.3- EE-SIM DESING TOOLS DE MAXIM INTEGRATED

EE-Sim Design Tools es una suite de herramientas de diseño en línea ofrecida por Maxim Integrated, una empresa líder en la fabricación de circuitos integrados y semiconductores. (<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ee-sim.html>).

Estas herramientas permiten a los ingenieros y diseñadores seleccionar y diseñar componentes electrónicos para sus proyectos de manera eficiente. Similar a WEBENCH de Texas Instruments, EE-Sim Design Tools ayuda a simplificar y agilizar el proceso de diseño electrónico.

Las herramientas de diseño EE-Sim ofrecen una serie de capacidades, que incluyen:

1. **Selección de Componentes:** Los usuarios pueden ingresar los requisitos de diseño, como voltajes, corrientes, frecuencias, y otros parámetros. La herramienta sugiere componentes adecuados del catálogo de Maxim Integrated que cumplen con estos requisitos.
2. **Diseño de Circuitos:** Una vez seleccionados los componentes, los usuarios pueden crear circuitos y sistemas utilizando las herramientas de diseño proporcionadas. Esto incluye la posibilidad de diseñar sistemas de energía, filtros, amplificadores y otros circuitos.
3. **Simulación:** Las herramientas permiten a los usuarios simular el comportamiento de los circuitos bajo diferentes condiciones y escenarios. Esto ayuda a identificar posibles problemas y optimizar el rendimiento.
4. **Análisis de Rendimiento:** Los usuarios pueden analizar el rendimiento de los circuitos diseñados, incluyendo características como eficiencia, estabilidad, respuesta en frecuencia y más.
5. **Generación de Documentación:** Las herramientas permiten a los usuarios generar informes técnicos, esquemas de circuitos y listas de materiales para su documentación y referencia.

A continuación, se realizará un circuito de ejemplo para demostrar el funcionamiento del programa y ver las características y la posibilidad de uso para los alumnos.

Para ello se empezará introduciendo las especificaciones de tensión e intensidad deseadas (Figura 43).

Find DC-DC Converter

Enter your requirements and select a part for the EE-Sim Tool to design:

Input		Output	
Min. Input Voltage	4.75 V	☒ Output 1	Vout 3.3 V Iout 1 A
Max. Input Voltage	5.25 V	☐ Output 2	Vout 3.3 V Iout 1 A
Nom. Input Voltage	5 V	Isolated?	No ☒ Yes ☐

Find

Figura: 43 Especificaciones de diseño en EE-Sim

Una vez introducidas las especificaciones, se elegirá el convertidor que más interese según el diseñador, en este caso será el convertidor MAX17624 (Figura 44), elegido arbitrariamente para demostrar el uso del software.

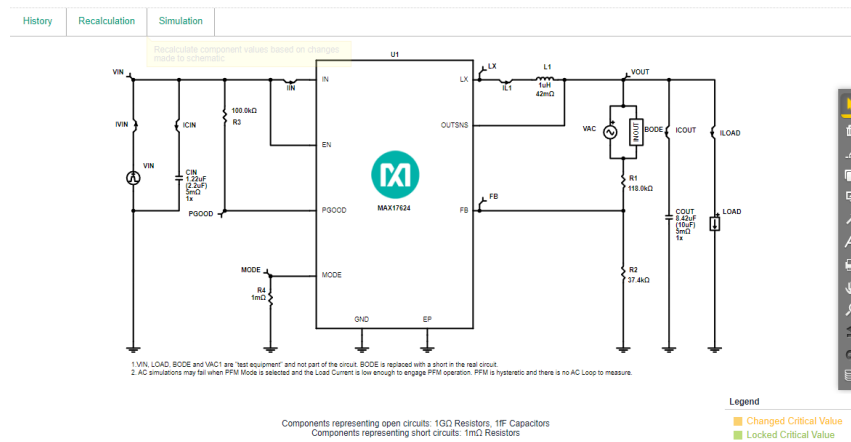


Figura: 44 convertidor MAX17624

Dentro de la herramienta podemos simular las gráficas para ver la tensiones y corrientes (Figura 45), para ver la eficiencia del convertidor (Figura 46), y además, se puede representar las pérdidas de potencia y temperatura de las uniones.

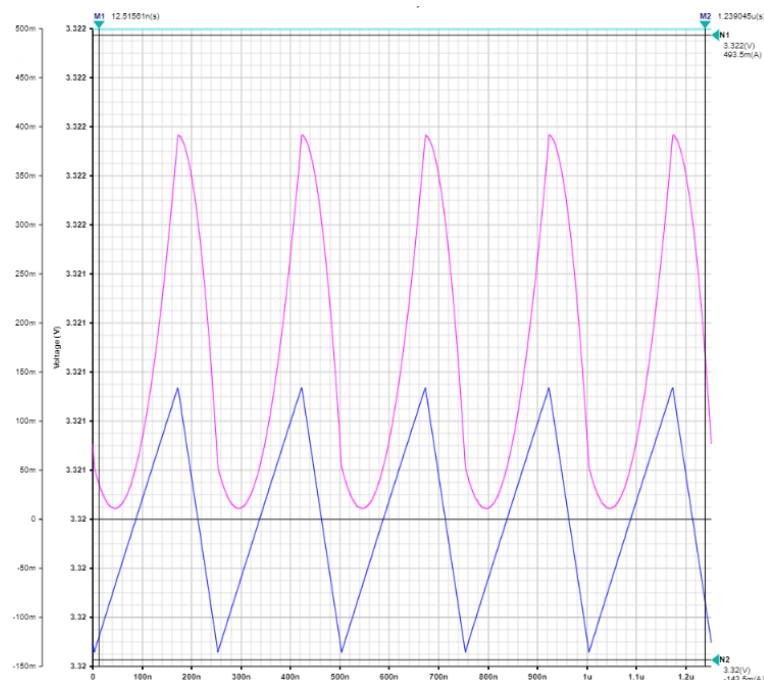


Figura: 45 Graficas representativas en EE-Sim

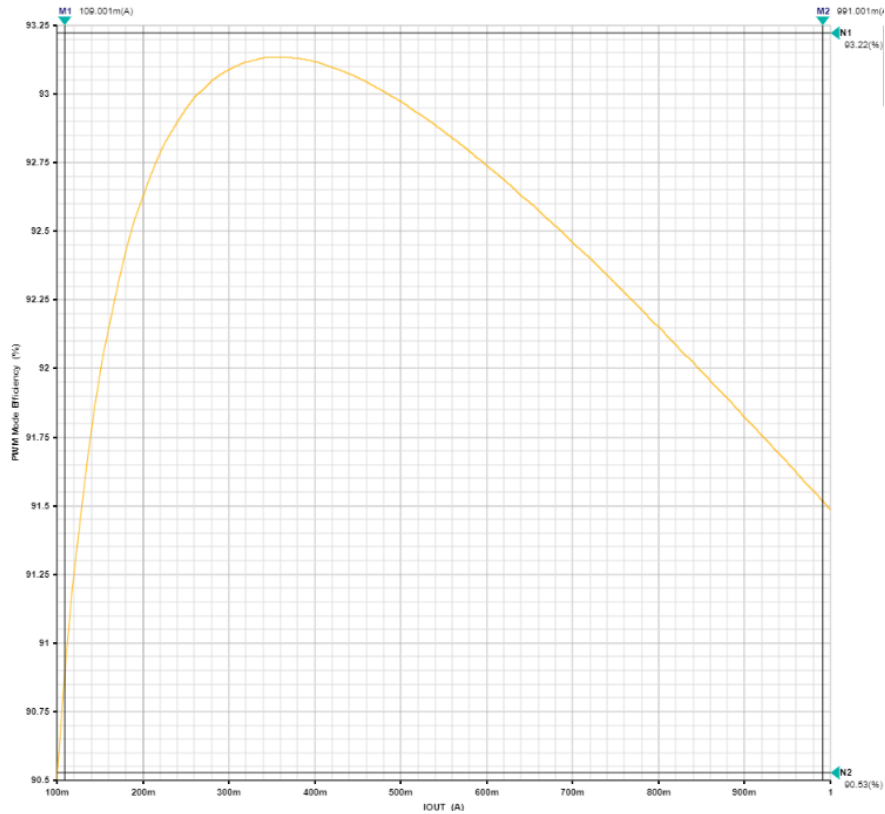


Figura: 46 Eficiencia del circuito en función de la corriente representada en EE-Sim

En resumen, EE-Sim Design Tools de Maxim Integrated proporciona una plataforma en línea para ayudar a los ingenieros y diseñadores a diseñar y analizar circuitos electrónicos utilizando componentes de Maxim Integrated. Estas herramientas son útiles para ahorrar tiempo y esfuerzo en el proceso de diseño, al mismo tiempo que aseguran que los componentes seleccionados sean adecuados para los requisitos del proyecto.

8.4- ONSEMICONDUCTORS

ON Semiconductor es una empresa líder en la fabricación de semiconductores y soluciones de energía eficiente. La empresa diseña, fabrica y comercializa una amplia gama de dispositivos y componentes electrónicos que se utilizan en diversas aplicaciones, como automoción, electrónica industrial, comunicaciones, energía, médica y más. <https://www.onsemi.com/>

Algunos de los productos y áreas en los que ONSemiconductor tiene presencia incluyen:

1. **Dispositivos de Potencia:** ONSemiconductor produce una amplia variedad de componentes de potencia, como MOSFETs, IGBTs (Transistores Bipolares de Puerta Aislada), diodos rectificadores, reguladores de voltaje y otros dispositivos utilizados en sistemas de energía y electrónica de potencia.
2. **Sensores:** La empresa fabrica sensores para medir variables como luz, temperatura, presión, humedad y más. Estos sensores son esenciales para

diversas aplicaciones, como electrónica automotriz, electrodomésticos y equipos industriales.

3. **Gestión de Energía:** ONSemiconductor ofrece soluciones para la gestión eficiente de la energía, incluyendo controladores de alimentación, controladores de carga de batería y otros componentes relacionados con la conversión y distribución de energía.
4. **Automoción:** La empresa suministra una amplia gama de componentes electrónicos para la industria automotriz, incluyendo sensores, dispositivos de potencia, sistemas de iluminación LED, circuitos integrados para sistemas de entretenimiento y mucho más.
5. **Comunicaciones:** ONSemiconductor fabrica componentes para aplicaciones de comunicación, como amplificadores, convertidores de datos, circuitos integrados de radiofrecuencia (RF) y más.
6. **Electrónica Industrial:** Proporciona soluciones electrónicas para aplicaciones industriales, como automatización, control de procesos, maquinaria industrial y más.
7. **Soluciones Inalámbricas:** ONSemiconductor también tiene productos para aplicaciones inalámbricas, como conectividad Bluetooth, Wi-Fi y Zigbee.

La empresa tiene un enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia energética en sus productos, lo que se alinea con las tendencias actuales en la industria electrónica. ONSemiconductor también se dedica a la innovación y al desarrollo de soluciones avanzadas para satisfacer las necesidades cambiantes de la industria y la tecnología.

A continuación, se realizará un circuito de ejemplo para demostrar el funcionamiento del programa y ver las características y la posibilidad de uso para los alumnos.

Para ello se empezará introduciendo las especificaciones de tensión e intensidad deseadas (Figura 47).

The image shows a web-based design tool interface for Onsemi. It is divided into two main sections: 'Input' and 'Output'.
In the 'Input' section, there is a 'Supply Type' selector with 'DC' selected and 'AC' as an option. Below this, there are two input fields for voltage: 'Vin min' set to 12 V and 'Vin max' set to 18 V. There is also a dropdown menu for 'Optional parameters'.
In the 'Output' section, there are two output fields: 'Vout' set to 3.3 V and 'Iout' set to 1 A. Below these, there is a toggle switch labeled 'Isolated only' which is currently turned off.
At the bottom of the interface, there is a 'Design Parameters' dropdown menu, a 'RESET' button, and a 'CALCULATE DESIGNS' button.

Figura: 47 Valores de diseño en Onsemi

Una vez elegidos los valores de tensión y corriente se proseguirá eligiendo el circuito que más interese (Figura 48), en este caso se elegirá el convertidor FAN251015MNTXG (Figura 49).

Rank ↑	Design	Design Schematic	Topology	Automotive Qualified	Design Efficiency [%]	Design IC Junction Temperature [°C]
1	NCP12711ADNR2G VIEW DESIGN Datasheet		Fixed Frequency Flyback	✗	69.84	28.04
2	NCV12711ADNR2G VIEW DESIGN Datasheet		Fixed Frequency Flyback	✓	69.84	28.04
3	FAN251015MNTXG VIEW DESIGN Datasheet		Buck	✗	85	31.58

Figura: 48 Datos de los circuitos a elegir en Onsemi

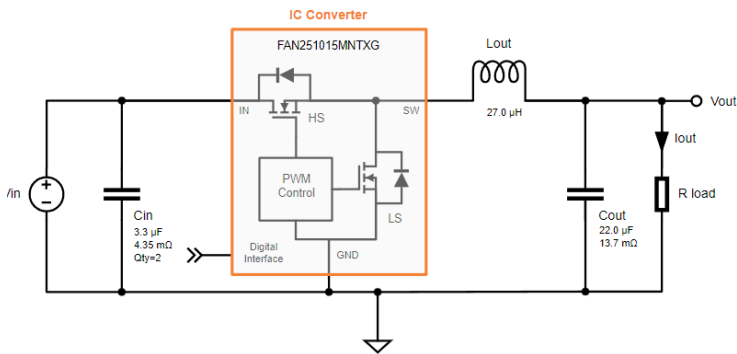


Figura: 49 Circuito Buck de Ejemplo sobre el convertidor FAN251015MNTXG en Onsemi

Una vez elegido el convertidor, se podrá simular las gráficas, estas representan la eficiencia frente a la intensidad de salida (Figura 50), y frente a la tensión de entrada a diferentes corrientes de salida (Figura 51), el ciclo de trabajo (Figura 52), la temperatura de la unión (Figura 53) y la disipación de potencia (Figura 54).

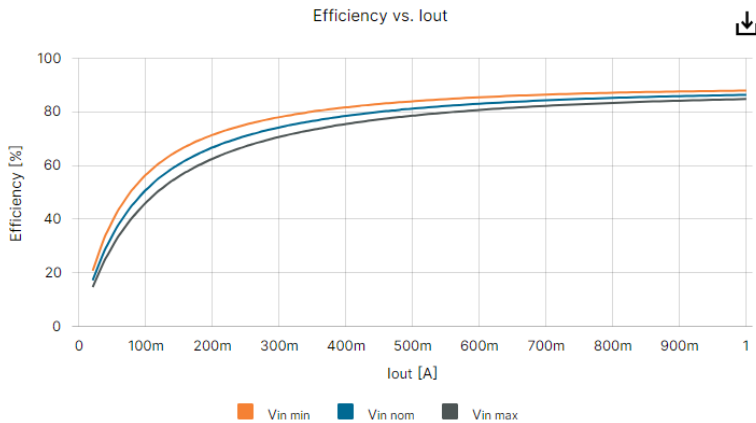


Figura: 50 Grafica de la eficiencia en función de la corriente de salida para los distintos valores de corriente de salida cuando el rango de tensión de entrada varía entre min y max en Onsemi

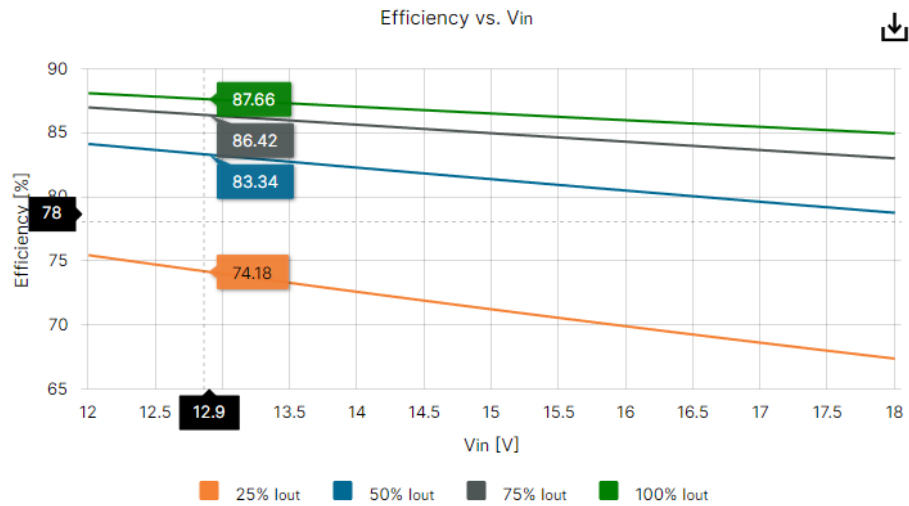


Figura: 51 Grafica de la eficiencia en función de la tensión de entrada para los distintos valores de la corriente de carga en Onsemi

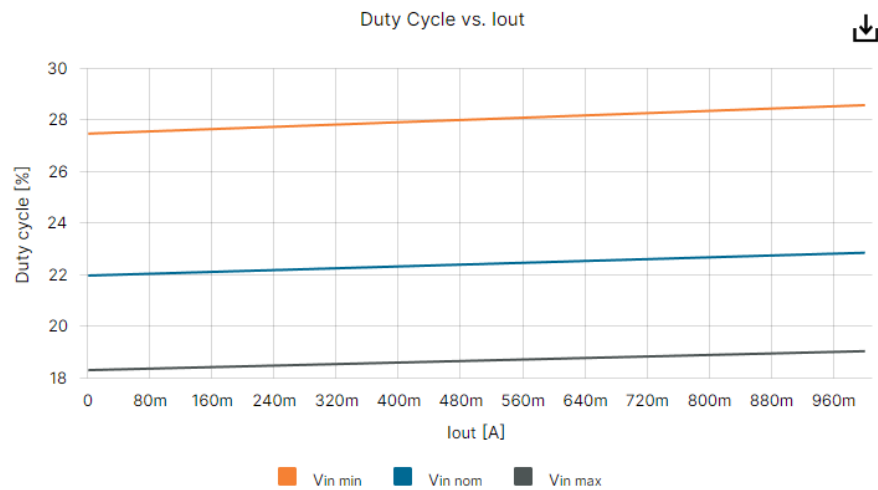


Figura: 52 Grafica del ciclo de trabajo para los distintos valores corriente de salida en Onsemi

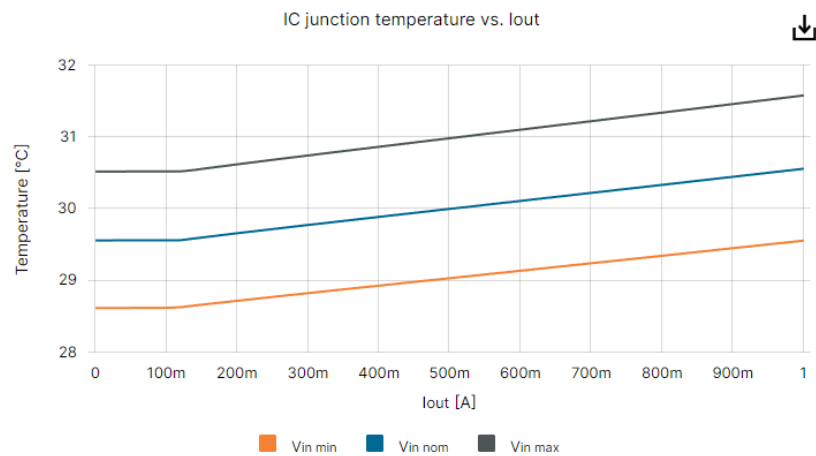


Figura: 53 Grafica que representa la variación de temperatura en el semiconductor para los distintos valores de la corriente cuando el rango de tensión de entrada varía entre min y max en Onsemi

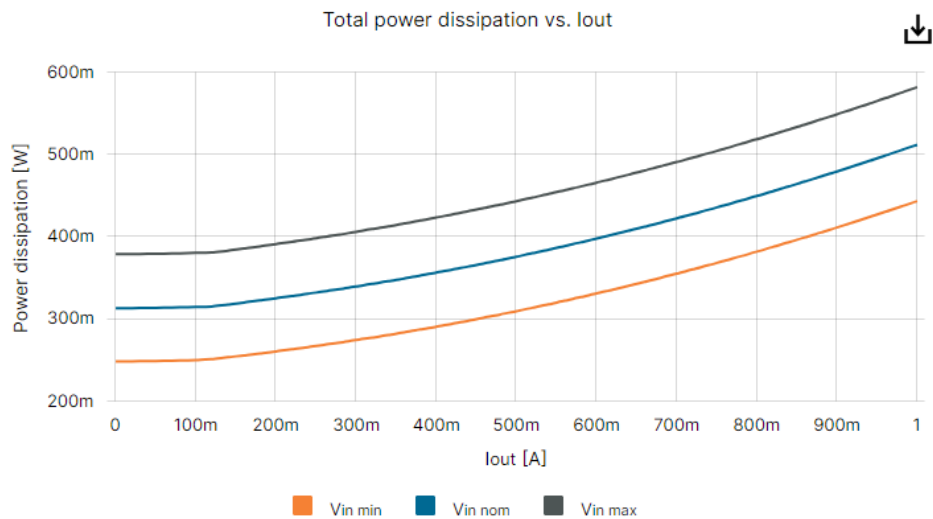


Figura: 54 Grafica de la disipación de la potencia respecto a la tensión de salida cuando el rango de tensión de entrada varía entre min y max del circuito en Onsemi

Por último, destacamos la información de los valores dentro del circuito (Figura 53), que nos muestra una valiosa información, para conocer los parámetros del circuito como el ciclo de trabajo, la eficiencia, tensiones de entrada y salida, además de valores de trabajo de los componentes que están integrados en el circuito y la lista de los materiales (BOM) (Figura 54).

SCHEMATIC			OPERATING VALUES			CHARTS		
All			System Information			IC		
						MOSFET		
						Capacitor		
						Inductor		
						Power		
Name		Value		Description				
Conduction Mode		CCM		Continuous conduction mode				
D		19.07 %		Duty cycle - on time to total switching time ratio				
η		85.0 %		Power conversion efficiency				
f		400.0 kHz		Switching frequency				
VIN		18.0 V		Input voltage				
VOUT		3.3 V		Output voltage				
VOUT(pp)		4.98 mV		Output voltage ripple (peak-to-peak value)				
IOUT		1.0 A		Output current				
POUT		3.3 W		Output power				
IL(av)		1.0 A		Average inductor current				

*Operating values are calculated for maximum input voltage (18 V) and maximum load current (1 A).

Figura: 55 Información de los valores del circuito

Bill of Materials

Part	Manufacturer	Part Number	Quantity	Total Price [\$/1ku]	Attributes	Total Footprint [mm²]
L_{OUT}	Würth Elektronik	7447789127	1	1.65	L = 27.0 μ H Rdc = 130.0 m Ω Irms = 1.27 A Isat = 1.35 A Height = 3.2 mm	53.29
IC	onsemi	FAN251015MNTXG	1	1.96	Min. order = 4000 Package = WQFN-34	42
C_{IN}	TAIYO YUDEN	UMK325B7335MM-P	2	0.47	C = 3.3 μ F Vdc = 50.0 V ESR(SRF) = 4.35 m Ω Height = 2.7 mm	16
C_{OUT}	Würth Elektronik	875105240003	1	0.30	C = 22.0 μ F Vdc = 10.0 V ESR(SRF) = 13.7 m Ω Diameter = 4.0 mm Height = 5.5 mm	18.5
			5	4.38		129.79

Figura: 56 BOM del circuito en Onsemi

8.5- LTPOWERCAD II

LTPowerCAD II es una herramienta de diseño de circuitos desarrollada por Analog Devices, específicamente diseñada para ayudar en la selección, diseño y simulación de circuitos de suministro de energía lineal (LTspice). Está dirigida a ingenieros que trabajan en el diseño de sistemas de alimentación y buscan herramientas especializadas para optimizar y simular estos circuitos. <https://www.analog.com/en/lp/ltpowercad.html>

Las características y utilidades principales de LTPowerCAD II incluyen:

1. **Selección de componentes:** La herramienta permite seleccionar y filtrar componentes específicos de los productos de Analog Devices para adaptarse a los requerimientos del diseño del sistema de alimentación. Para elegir estos componentes tendremos que elegir las especificaciones de diseño, pudiendo elegir componentes concretos (Figura 57), filtrando por su topología y tipo (Figura 58) e introduciendo los valores de entrada y salida deseados (Figura 59) (no es necesario rellenar todo, el programa buscará los controladores que se adapten a las especificaciones).

Optional Features

☒ Synchronous
 ☐ DCM Capable

☒ Run / Enable
 ☐ Ext. Clock

☐ Output Tracking
 ☐ Remote Sensing

☐ Margining
 ☐ Power Good

☐ Parallel
 ☐ Low EMI / Silent

☐ I2C/PMBus
 ☐ Isolated

☐ Int. & Ext. Comp.
 ☐ Automotive

☐ MP Temp. Grade

Search Options

All Parts

☐ Keep Search Page Open

Reset Filters

Find Part (####) Find

Figura: 57 Introducción a LTPowerCAD (Opciones del convertidor)

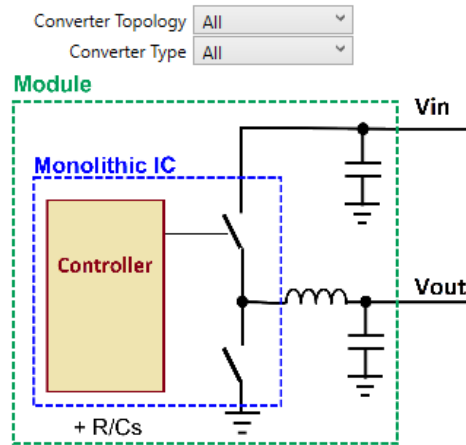


Figura: 58 Topología y tipo de convertidor en LTPowerCAD

Converter Specification

Input

Vin min. V
Vin nom. V
Vin max. V

Output 1

Vout1 V
Iout1 A

Outputs: One
Max. Paralleled: 1

Enter Fsw. for Best Search Results

Frequency Fsw. kHz
Max. Height mm

Search Parts

Figura: 59 Valores del convertidor en LTPowerCAD

- Diseño de circuitos personalizados:** Permite a los usuarios crear y simular circuitos de suministro de energía lineal utilizando una amplia gama de dispositivos y topologías disponibles en la biblioteca de Analog Devices, aquí un ejemplo de varios convertidores para elegir (Figura 60), estos se pueden filtrar para encontrar el controlador que mejor se adapte al diseño que se quiere realizar.

PWM Converters		LDOs		Protection Controllers		Switch-Cap Converters		
Search For Parts		Search For Solutions						
Design Tool		Website	Part #	Topology	Type	Description	Year Released	
								
			Web	LTM4652(Inverting)	Inverting Buck-Boost	uModule	4.5-18Vin, 0.6V to 7.5Vo, Bidirectional Dual 25A or single 50A (Ldc) Step-Down (buck) uModule in 16x16x4.92mm, BGA	2022
			Web	LTM4673	Buck	uModule	3.1V-15Vin to dual 12A 0.6V-3.6Vo and dual 5A 0.6V-5.5Vo, Step-Down (buck) uModule with Digital PMbus Interface	2021
			Web	LTM4670	Buck	uModule	2.25V-5.5Vin to 0.5V-Vin Output, Quad 10A Step-Down (buck) Silent Switcher uModule in 7.5x15x4.65mm, BGA	2021
			Web	LTM4655	Buck	uModule	EN55022B Low EMI, 3.1-40Vin, 0.5V-26.5Vo, dual 4A or single 8A Step-Down (buck) or 50W Inverting uModule in 16x16x4.92mm BGA	2021
			Web	LTM4705	Buck	uModule	3.1-20Vin, 0.6V-5.5Vo, dual 5A or single 10A Step-Down (buck) uModule in 6.25x7.5x3.22mm, BGA	2021

Figura: 60 Ejemplo de variedad de convertidores en LTPowerCAD

- Simulación y análisis:** Ofrece capacidades de simulación utilizando LTspice, permitiendo a los ingenieros probar y analizar el comportamiento de sus diseños bajo diferentes condiciones de carga, voltaje, temperatura, entre otros

parámetros. Obteniendo las gráficas de la eficiencia, las pérdidas y el diagrama de bode (Figura 61 y 62)

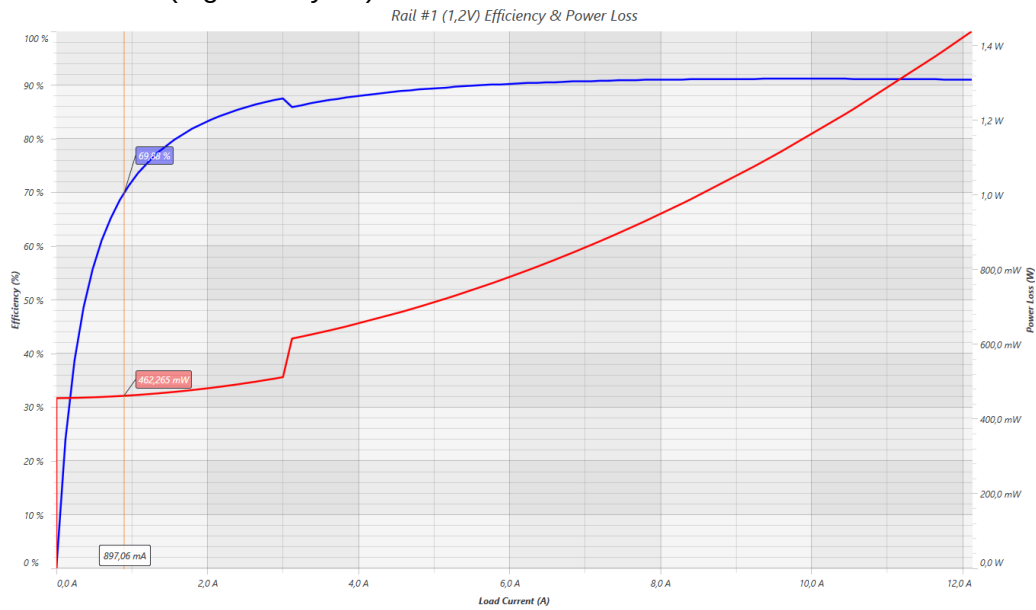


Figura: 61 Eficiencia y pérdidas dentro del convertidoren LTpowerCAD

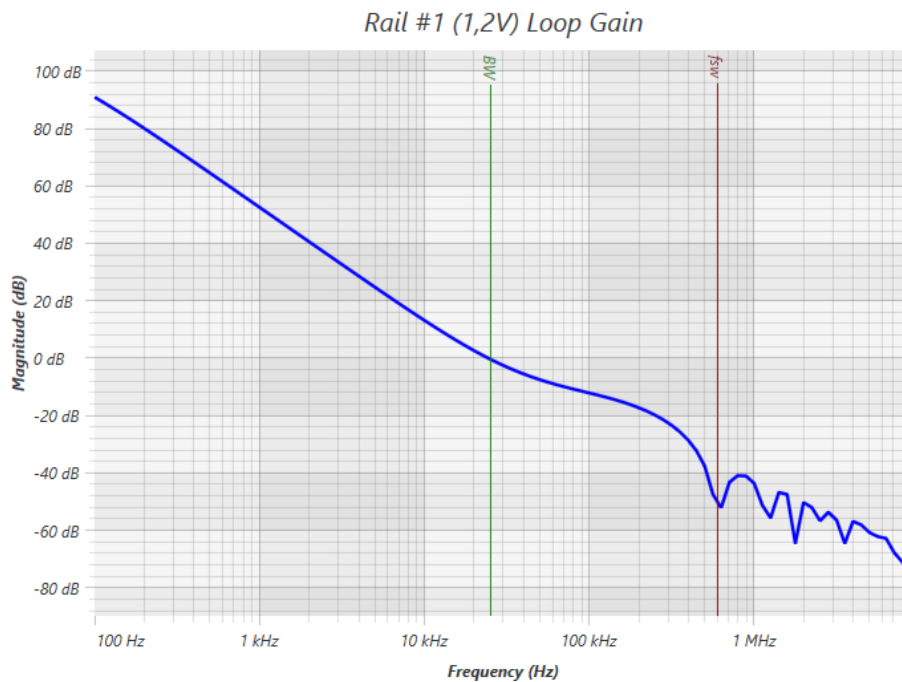


Figura: 62 Diagrama de Bode en LTpowerCAD

4. **Optimización del diseño:** Los usuarios pueden iterar y ajustar los componentes del circuito para optimizar el rendimiento, la eficiencia energética y la estabilidad del sistema de alimentación.
5. **Generación de esquemas y documentación:** Facilita la creación de esquemas y la generación de documentación para el diseño de circuitos, lo que resulta útil para presentaciones o informes técnicos.

A continuación, se realizará un circuito de ejemplo para demostrar el funcionamiento del programa y ver las características y la posibilidad de uso para los alumnos.

Para ello se empezará seleccionando un controlador que se adapte a las necesidades del diseño, para realizar un ejemplo se ha cogido un regulador cualquiera ya que no hay una necesidad de diseño, en este caso el regulador reductor DC/DC LTM4673 (Figura 63), en este apartado es posible variar todas las casillas señaladas en azul para adaptarlo a las necesidades del diseño, además cuenta con una tabla donde podremos cambiar los valores de tensión de entrada y salida y la temperatura.

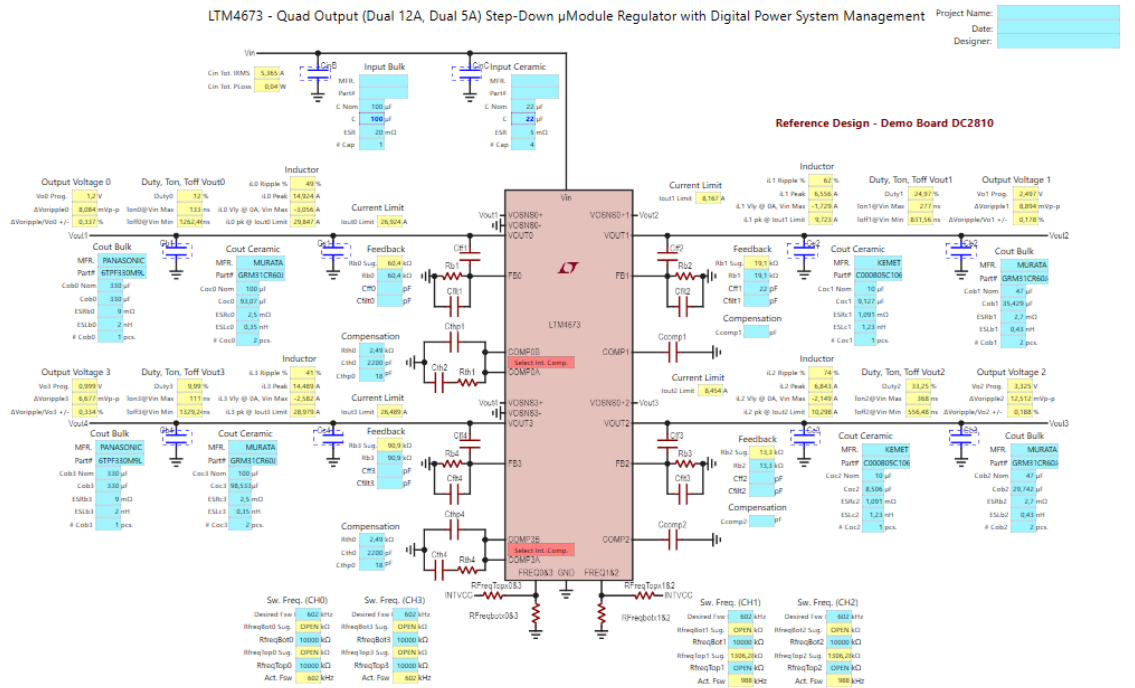


Figura: 63 Convertidor LTM4673 en LTpowerCAD

Este programa tambien cuenta con tablas donde podemos ver las especificaciones de diseño (Figura 64), el listado de materiales (BOM) (Figura 65).

LTM4673 Supply Design Summary

Project Info:

Steady State :				
Rail #	Vin Min.	Vin Nom.	Vin Max.	Fsw
1	5 V	10 V	15 V	602 kHz
2	5 V	10 V	15 V	988 kHz
3	5 V	10 V	15 V	988 kHz
4	5 V	10 V	15 V	602 kHz

Efficiency and Loop :

Rail #	Vo	Iomax	Eff.@Iomax	Ploss@Iomax
1	1,2 V	12 A	92,14 %	1,23 W
2	2,5 V	5 A	89,86 %	1,41 W
3	3,32 V	5 A	92,05 %	1,44 W
4	1 V	12 A	90,81 %	1,21 W

Figura: 64 Tabla de las especificaciones del diseño

Power Components Bill Of Materials : Export BOM

Ref. Des.	Value	Quantity	Description
U1		1	IC
Cinb1	100 μ F	1	CAP
Cinc1 Cinc2 Cinc3 Cinc4	22 μ F	4	CAP
Cob1	330 μ F	1	CAP
Coc1 Coc2	100 μ F	2	CAP
Cob2 Cob3	47 μ F	2	CAP
Coc3	10 μ F	1	CAP
Cob4 Cob5	47 μ F	2	CAP
Coc4	10 μ F	1	CAP
Cob6	330 μ F	1	CAP
Coc5 Coc6	100 μ F	2	CAP

Figura: 65 Lista de materiales (BOM) en LTpowerCAD

En resumen, LTPowerCAD II proporciona una plataforma integral para diseñar y simular circuitos de suministro de energía lineal, ayudando a los ingenieros a optimizar sus diseños y a acelerar el proceso de desarrollo de productos en el ámbito de la electrónica de potencia, además de ser una herramienta donde se pueden modificar muchos parámetros para llegar a la solución que más interese, aunque necesita un nivel mayor de conocimientos y para el aprendizaje del alumno quizás no sea el más adecuado, pero si es muy interesante para aquel que quiera profundizar un poco más en el diseño de circuitos.

8.6- SEMISEL

Semisel es una herramienta de diseño de circuitos desarrollada por Semikron, específicamente diseñada para ayudar en la selección, diseño y simulación de circuitos de electrónica de potencia (Figura 66). Está dirigida a ingenieros que trabajan en el diseño de sistemas de alimentación y buscan herramientas especializadas para optimizar y simular estos circuitos. <https://www.semikron-danfoss.com/service-support/semisel-simulation.html>

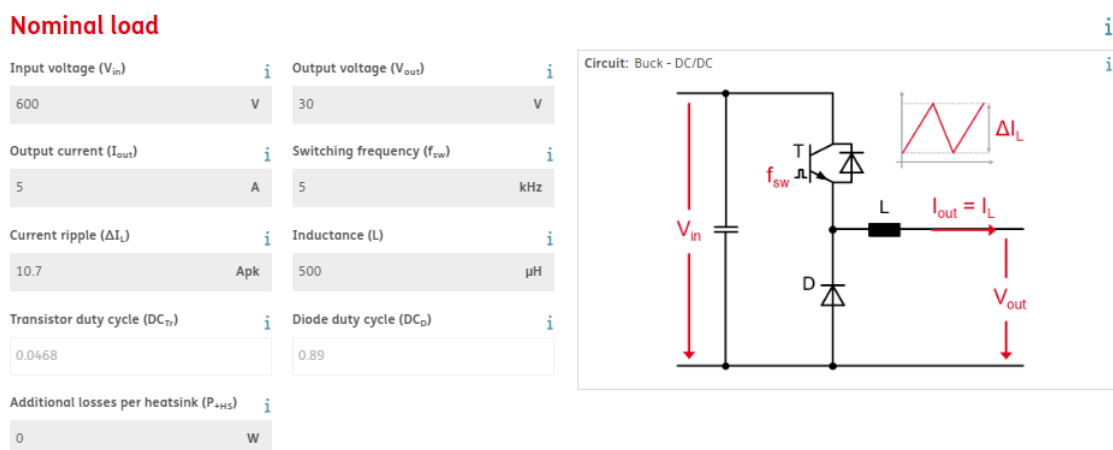


Figura: 66 Convertidor Buck en Semisel Simulation

El usuario puede hacer el estudio de forma gratuita y sin tener que registrarse en la página. Introduciendo las características del inversor del cual el usuario quiera hallar las

pérdidas y temperaturas (Figura 67), el programa online las halla automáticamente (la información del dispositivo que requiere este programa se encuentra en la hoja de características).

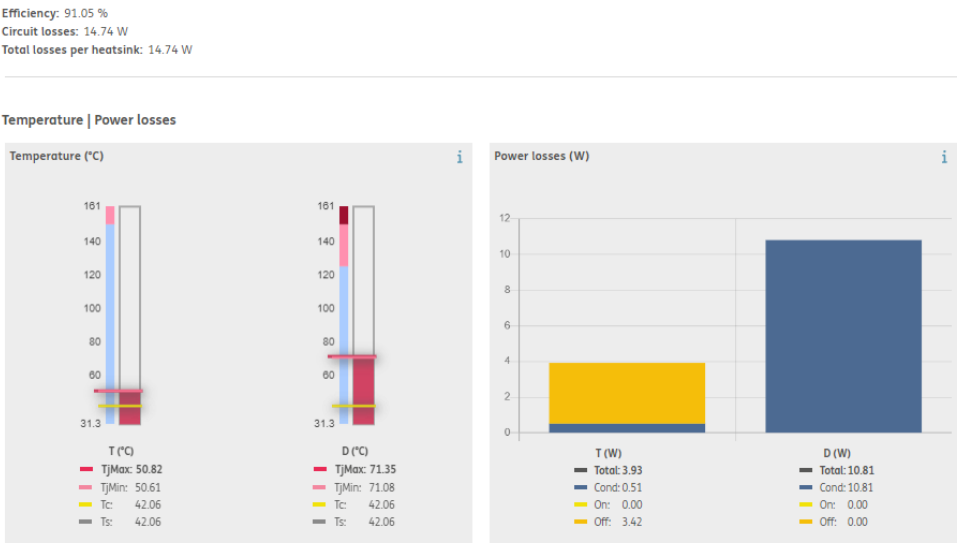


Figura: 67 Perdidas y Temperaturas en el convertidor simuladas en Semisel Simulation

Las características y utilidades principales de Semisel incluyen:

1. **Selección de componentes:** La herramienta permite seleccionar y filtrar componentes específicos de los productos de Semikron para adaptarse a los requerimientos del diseño del sistema de alimentación.
2. **Diseño de circuitos personalizados:** Permite a los usuarios crear y simular circuitos de suministro de energía lineal utilizando una amplia gama de dispositivos y topologías disponibles en la biblioteca de Semikron (Figura 68).

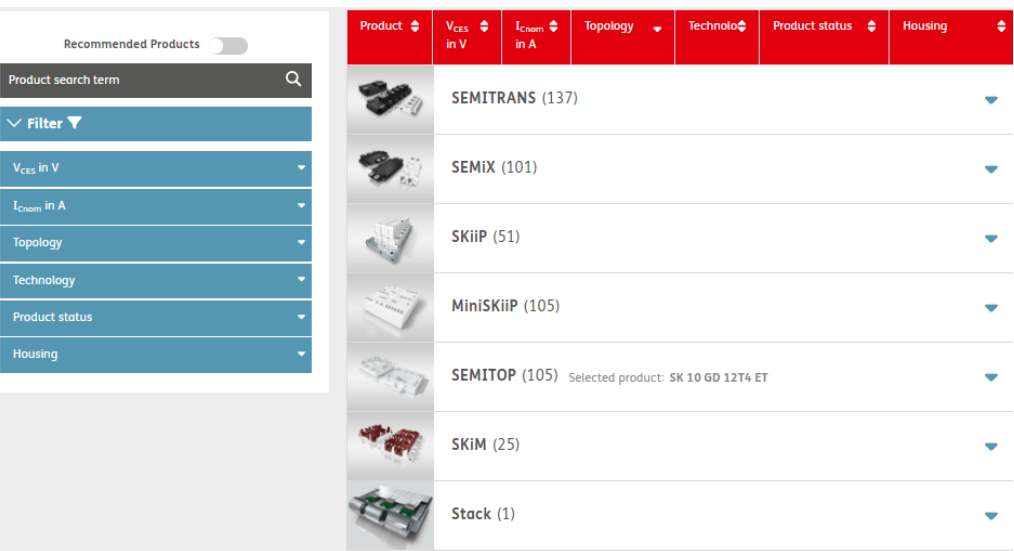


Figura: 68 Ejemplo de selección de componentes en Semisel Simulation

3. **Simulación y análisis:** Permite a los ingenieros probar y analizar el comportamiento de sus diseños bajo diferentes condiciones de carga, voltaje, temperatura, entre otros parámetros.
4. **Optimización del diseño:** Los usuarios pueden iterar y ajustar los componentes del circuito para variar la eficiencia, la pérdida y la temperatura del circuito.
5. **Generación de esquemas y documentación:** Facilita la creación de esquemas y la generación de documentación para el diseño de circuitos, lo que resulta útil para presentaciones o informes técnicos.

8.7- CONCLUSIÓN DE LOS SIMULADORES ONLINE DE FABRICANTES

En general, cada software tiene sus propias características distintivas y puntos fuertes. La elección entre ellos dependerá de las preferencias personales, la experiencia en diseño de energía y las necesidades específicas de diseño y simulación. Es recomendable explorar cada una de estas herramientas más a fondo para determinar cuál se adapta mejor a los requerimientos.

Software de fabricante	ST	Texas	Onsemi	Maxim	Semisel	LTPowerCAD
Características						
Software intuitivo	X	X	X	X		
Aviso de errores y recomienda valores		X		X		X
Gráficas interactivas	X	X	X			
Muestra resumen	X	X	X			X
Comprobación con distintos componentes	X	X			X	X
Útil a nivel didáctico	X			X		X
Variedad de componentes y convertidores	X	X		X	X	X
Comparación entre convertidores	X	X				

Tabla 1: Comparativa de softwares de fabricantes

Una vez vista la comparativa (Tabla 2) de los diferentes simuladores ofrecidos por los fabricantes destacaremos la herramienta ofrecida por ST debido a su software intuitivo, graficas, facilidad de cambiar elementos dentro del circuito, variedad, posibilidad de comparación ente diferentes convertidores, su utilidad a nivel didáctico y por su poca complejidad a la hora de realizar los diseños, ya que en pocos pasos y con pocos datos podemos tener un diseño de un convertidor sin necesidad de modificar demasiados parámetros o que haya un exceso de información como en el de Texas.

9.- MÓDULO L298N

El L298N (Figura 69) es un circuito integrado diseñado para controlar motores de corriente continua (DC) y motores paso a paso. Es ampliamente utilizado en proyectos de robótica, electrónica y automatización debido a su facilidad de uso y versatilidad. Haremos una descripción básica de las características y el funcionamiento del controlador de motores L298N. Las imágenes han sido obtenidas de <https://www.prometec.net/l298n/>

Esta placa se convierte en una herramienta muy útil para explorar en detalle las características de un convertidor DC-DC de tipo puente y profundizar en el concepto de modulación PWM. Al ser controlada por un microcontrolador Arduino, no solo ofrece la oportunidad de comprender teóricamente estos conceptos, sino que también permite una experiencia práctica en la que los alumnos pueden interactuar directamente con el funcionamiento y los parámetros del convertidor. Esta combinación de teoría y práctica enriquece significativamente el aprendizaje, proporcionando una comprensión más completa de estos principios fundamentales en la electrónica de potencia.

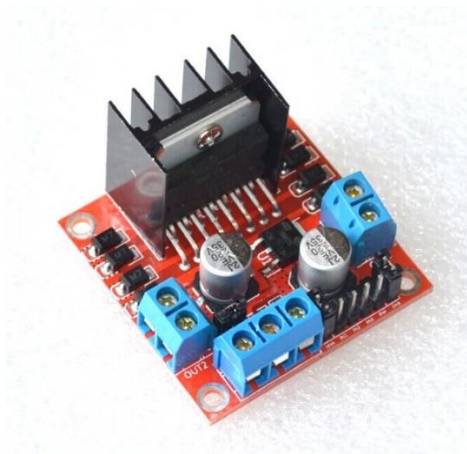


Figura: 69 Controlador de motores L298N

Características principales:

1. **Control bidireccional:** El L298N permite controlar la dirección y la velocidad de un motor de corriente continua (DC) o un motor paso a paso. Puede controlar dos motores de forma independiente o un motor de pasos bipolar.

2. **Alta corriente:** Este controlador es capaz de manejar corrientes de hasta 2 amperios por canal (para un total de 4 amperios si se utilizan ambos canales), lo que lo hace adecuado para motores de corriente continua de tamaño mediano.
3. **Protección térmica:** El L298N incluye protección contra sobrecalentamiento incorporada para evitar daños al controlador.

Características electrónicas:

- Driver: L298N.
- Tensión de alimentación del driver: 6-48V
- Intensidad máxima de cada canal del driver: 2A.
- Salida lógica de 5V.
- Potencia máxima 25W, a una temperatura de 75°C.
- Temperatura de trabajo: -25°C a 130°C.

En cuanto a su funcionamiento el L298N se conecta a una fuente de alimentación externa (generalmente una batería) y a un microcontrolador como Arduino para recibir señales de control. A continuación, se describen los pines más importantes del L298N y se presenta su diagrama de bloques interno (Figura 70):

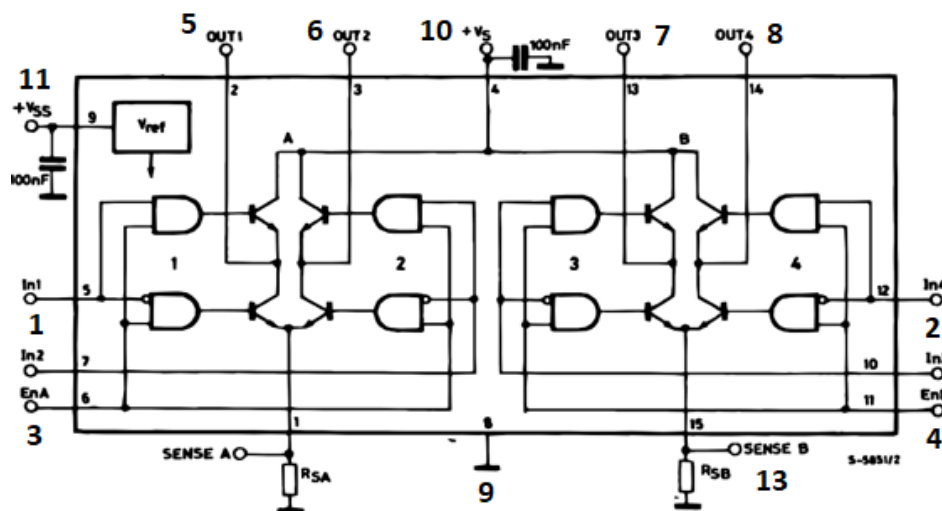


Figura: 70 Diagrama de bloques del módulo L298N

- **IN1 e IN2:** Estos pines se utilizan para controlar la dirección del motor 1. Al cambiar los niveles lógicos en estos pines (alto, bajo o inverso), se puede hacer que el motor gire hacia adelante, hacia atrás o se detenga.

- **IN3 e IN4:** Estos pines se utilizan de manera similar a los pines IN1 e IN2, pero para controlar el motor 2.
- **ENA y ENB:** Estos pines controlan la velocidad del motor 1 (ENA) y el motor 2 (ENB). Al aplicar una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) a estos pines desde el microcontrolador, se puede controlar la velocidad de los motores.
- **OUT1, OUT2, OUT3, OUT4:** Estos pines son las salidas a los terminales del motor. Se conecta los terminales del motor a estas salidas.
- **+12V y GND:** Estos pines se conectan a la fuente de alimentación externa que proporciona la tensión necesaria para alimentar los motores.

Es importante seguir el esquema de conexión y las recomendaciones del datasheet del L298N para evitar daños en el controlador o en los motores.

En resumen, el L298N es un controlador de motores versátil que te permite controlar la dirección y la velocidad de motores de corriente continua o motores paso a paso. Puede ser una herramienta muy útil en proyectos de robótica y automatización.

Para el desarrollo de este trabajo sobre este módulo se llevó a cabo una exploración detallada del módulo L298N, en conjunto con la plataforma Arduino para el control de motores de corriente continua.

Inicialmente, se analizaron las entradas y salidas (Figura 71) y las conexiones necesarias con placa Arduino (Figura 72) añadiendo un potenciómetro adicional. Se destaca la importancia de las conexiones precisas entre el L298N y los pines de salida de la placa Arduino, así como la correcta vinculación del motor al controlador para un funcionamiento efectivo.

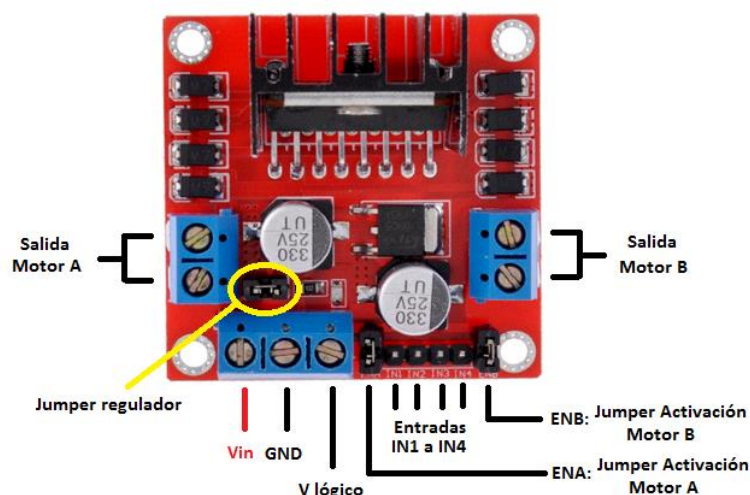


Figura: 71 Pin out de la placa L298N

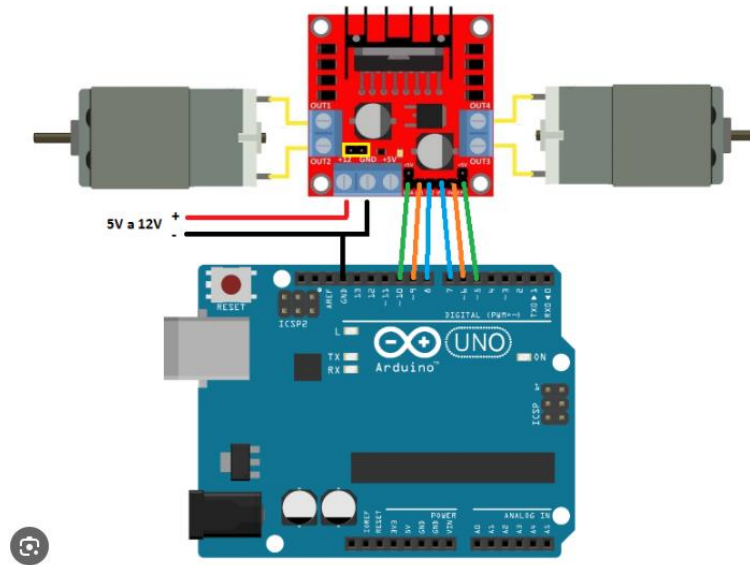


Figura: 72 Conexionado de la placa L298N con arduino

Seguidamente, se programó el entorno de desarrollo de Arduino, proporcionando un código sencillo para realizar el control del L298N (Figura 73). Se profundizó en el manejo de la dirección y la velocidad del motor mediante señales PWM y pines de dirección, para el control preciso del motor. Durante esta fase, se realizaron ajustes en el programa para experimentar con diversas configuraciones y analizar la respuesta del motor a cambios en la velocidad y la dirección.

```

1  int IN1=9;// Declaración de variables
2  int IN2=8;
3  int ENA=10;
4  int Potencia=0;
5  void setup() {
6      // put your setup code here, to run once:
7      pinMode(IN1, OUTPUT);// configuración de los pines de salida
8      pinMode(IN2, OUTPUT);
9      pinMode(ENA, OUTPUT);
10     Serial.begin(9600);// activación del puerto serie
11 }
12
13 void loop() {
14     // put your main code here, to run repeatedly:
15     Potencia = analogRead(A0); //Asignación de la potencia suministrada al motor para que gire mediante el teclado
16     analogWrite(ENA, Potencia); //Se escribe en el Pin ENA para que se transmita al motor desde el regulador
17     digitalWrite(IN1,HIGH); // Activación y desactivación de los pines para
18     digitalWrite(IN2,LOW); // que el motor gire en un sentido o en otro
19
20
21 }

```

Figura: 73 Código simple en Arduino de la conexión con el módulo L298N

Por último, una vez visto el correcto funcionamiento del control de los motores se procedió a realizar medidas con el osciloscopio para comprobar y analizar las formas de onda del PWM, tanto a la salida del Arduino como a la salida del módulo L298N. Para ello las medidas realizadas se hicieron variando la señal del PWM para así mostrar la variación del ciclo de trabajo que será lo que haga que varíe la velocidad del motor.

En la Figura 74 se puede ver la señal PWM generada por Arduino para un ciclo de trabajo de un 50% aproximadamente para lo que se obtiene un periodo de 2.04ms y un tiempo en ON de 1.048ms que hace que se obtenga un valor medio de tensión de 2.97. Además, podemos ver que el valor máximo de tensión a la salida es de unos 5.44V.

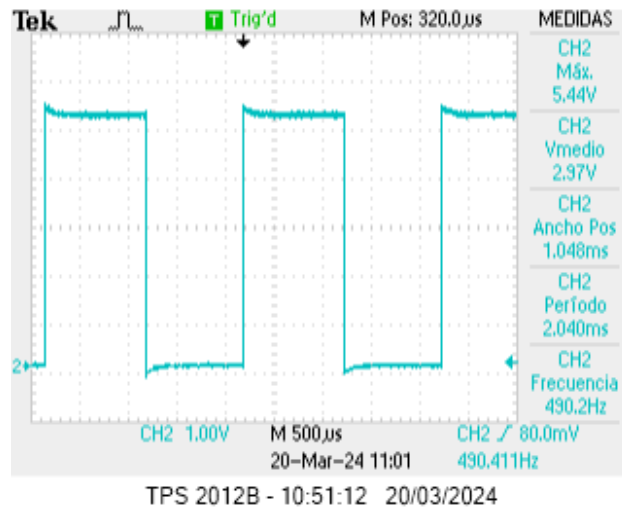


Figura: 74 Señal PWM al 50% generada por Arduino

En la Figura 75 se puede ver la señal PWM generada por Arduino para un ciclo de trabajo de un 90% aproximadamente para lo que se obtiene un periodo de 2.04ms y un tiempo en ON de 1.952ms que hace que se obtenga un valor medio de tensión de 4.89V. Además, podemos ver que el valor máximo de tensión a la salida es de unos 5.36V.

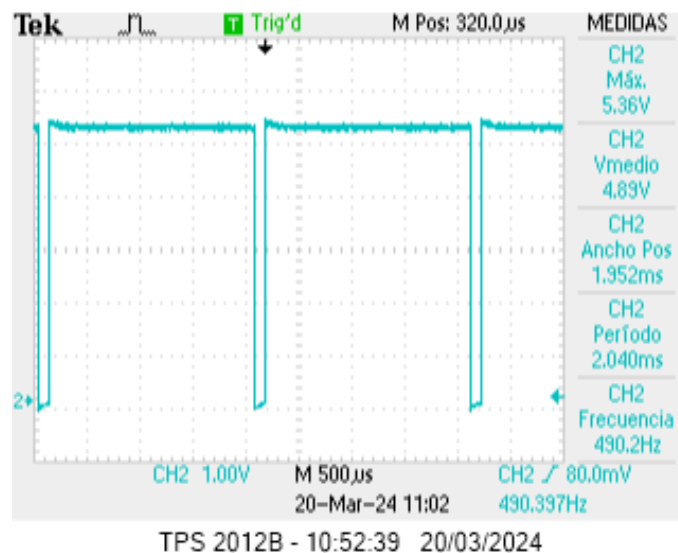


Figura: 75 Señal PWM al 90% generada por Arduino

En la Figura 76 se puede ver la señal PWM generada por Arduino para un ciclo de trabajo de un 10% aproximadamente para lo que se obtiene un periodo de 2.04ms y un tiempo en ON de 0.248ms que hace que se obtenga un valor medio de tensión de 0.79V. Además, podemos ver que el valor máximo de tensión a la salida es de unos 6.20V, que puede ser mayor debido al ruido que pueda generar algún pico.

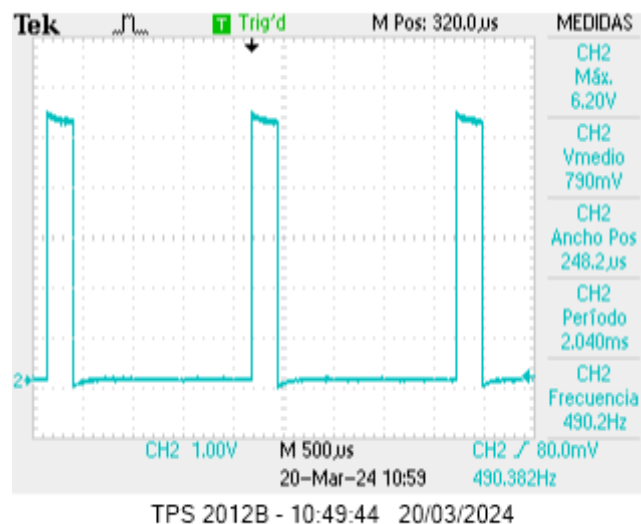


Figura: 76 Señal PWM al 10% generada por Arduino

En la Figura 77 se puede ver la señal PWM generada a la salida del regulador L298N para un ciclo de trabajo de un 30% aproximadamente para lo que se obtiene un periodo de 2.04ms y un tiempo en ON de 0.66ms que hace que se obtenga un valor medio de tensión de 3.56V. Además, para la tensión máxima salida debería tenerse alrededor de 12V, pero debido a pérdidas en el circuito se reduce un poco hasta un valor de 10.9V.

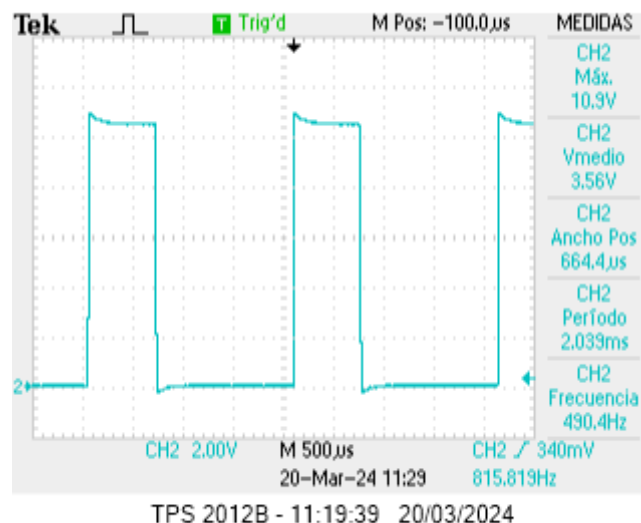


Figura: 77 Señal PWM al 30% generada a la salida del regulador L298N

En la Figura 78 se puede ver la señal PWM generada a la salida del regulador L298N para un ciclo de trabajo de un 70% aproximadamente para lo que se obtiene un periodo de 2.04ms y un tiempo en ON de 1.4ms que hace que se obtenga un valor medio de tensión de 3.56V. Además, para la tensión máxima salida debería tenerse alrededor de 12V, pero debido a pérdidas en el circuito se reduce un poco hasta un valor de 10.9V.

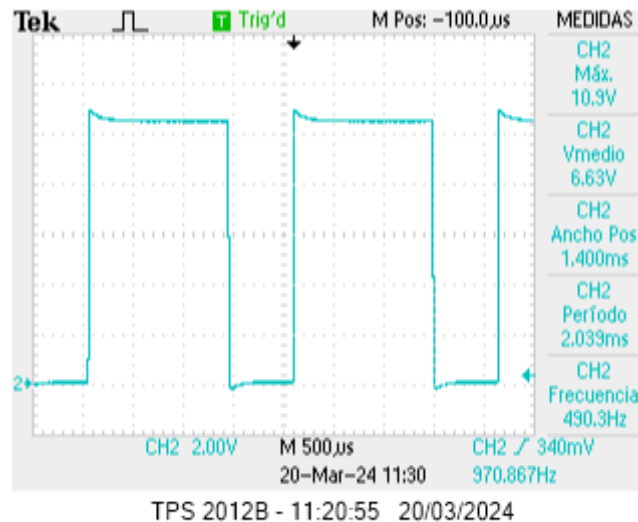


Figura: 78 Señal PWM al 70% generada a la salida del regulador L298N

10.- PLACAS DE BAJO COSTE UTILIZADOS EN LA DOCENCIA

Los convertidores Buck-Boost son componentes esenciales en la enseñanza de la electrónica de potencia debido a su amplia aplicación y relevancia. En el ámbito educativo, estos dispositivos ofrecen una oportunidad invaluable para explorar conceptos fundamentales y avanzados relacionados con la conversión de energía en sistemas de corriente continua (DC).

Al centrarse en la docencia de la electrónica de potencia, es fundamental proporcionar a los estudiantes una comprensión detallada del funcionamiento y la operación de los convertidores Buck-Boost. Esto implica no solo explicar los principios teóricos detrás de su funcionamiento, como la topología de circuito y los modos de conmutación, sino también realizar experimentos prácticos en laboratorio para demostrar su aplicación en la práctica.

Además, el estudio de los convertidores Buck-Boost en el contexto educativo abarca la resolución de problemas y la optimización de diseño. Los estudiantes no solo aprenden a calcular y analizar los parámetros de rendimiento de estos convertidores, como la eficiencia y la regulación de voltaje, sino que también se les desafía a diseñar circuitos eficientes que cumplan con ciertos requisitos de rendimiento y especificaciones de aplicación. El enfoque en la docencia de la electrónica de potencia también incluye la discusión de aplicaciones prácticas de los convertidores Buck-Boost en sistemas reales.

Ahora daremos paso a los modelos Buck que pueden ser realmente útiles en la docencia debido a su precio y las posibilidades que estos nos dan a la hora de demostrar al alumnado las posibilidades que estos tienen.

Circuitos de Diseño Buck (Modelos DIY):

Después de revisar diferentes fabricantes y distribuidores, se ha decidido seleccionar dos módulos de bajo coste de convertidores DC-DC tipo buck o reductores que vienen preensamblados con su circuito impreso. Estos módulos utilizan los circuitos integrados LM2596 y XL4015.

1. **LM2596:** Es un regulador step-down (Buck) popular y económico que se puede encontrar en forma de módulos de bajo coste. Es ideal para aplicaciones de baja potencia. Para este regulador tenemos tres configuraciones diferentes las cuales han sido medidas en el laboratorio, tanto con un multímetro como con el osciloscopio
2. **XL4015:** Similar al LM2596, el XL4015 es otro regulador step-down de bajo coste que se encuentra comúnmente como sistema con su circuito impreso ya montado. Es adecuado para aplicaciones con requisitos de corriente moderados. Para este regulador no ha sido posible realizar medidas sobre él debido a que no se encontraba disponible en el laboratorio y no se ha podido obtener.

Ahora daremos paso a los modelos Boost que pueden ser realmente útiles en la docencia debido a su precio y las posibilidades que estos nos dan a la hora de demostrar al alumnado las posibilidades que estos tienen. Dividiremos los circuitos de diseño y los chips integrados utilizados.

Circuitos de Diseño Boost (Modelos DIY):

Después de revisar diferentes fabricantes y distribuidores, se ha decidido seleccionar dos módulos de bajo coste de convertidores DC-DC tipo boost o elevadores que vienen preensamblados con su circuito impreso. Estos módulos utilizan los circuitos integrados MT3608 y XL6009.

1. **XL6009:** Similar al MT3608, el XL6009 es otro módulo step-up / step-down que se encuentra comúnmente en línea y es adecuado para elevar voltajes. Este regulador se ha medido en el laboratorio.
2. **MT3608:** Este es un módulo que puede funcionar como convertidor boost o Buck. Es popular y económico, adecuado para proyectos electrónicos de baja a moderada potencia. Para este regulador no ha sido posible realizar medidas sobre él debido a que no se encontraba disponible en el laboratorio y no se ha podido obtener.

En los próximos apartados analizaremos los convertidores que se han podido utilizar en las prácticas y veremos los convertidores que podrían entrar dentro de la docencia para un futuro uso.

En anteriores trabajos como el de Adrián [4], se analizan valores de entrada y salida lo cual volveremos a comprobar para analizar dificultades y ventajas de cada uno de los reguladores.

Para hacer este análisis se realizarán una serie de cálculos para comparar lo teórico con lo experimental y así obtener una comparativa y ver el rendimiento real que se obtiene con estos convertidores.

$$I_{out,teor} = \frac{V_{out}}{R_L} \quad (8.1)$$

$$I_{in,teor} = \frac{V_{out} \cdot I_{out,teor}}{V_{in}} \quad (8.2)$$

$$P_{teor} = V_{out} \cdot I_{out,teor} \quad (8.3)$$

$$P_{exp} = V_{out} \cdot I_{out,exp} \quad (8.4)$$

$$\eta_{exp} = \frac{P_{out,exp}}{P_{in,exp}} = \frac{V_{out} \cdot I_{out,exp}}{V_{in} \cdot I_{in,exp}} \quad (8.5)$$

$$\eta_{teor} = \frac{P_{out,teor}}{P_{in,teor}} = \frac{V_{out} \cdot I_{out,teor}}{V_{in} \cdot I_{in,teor}} \quad (8.6)$$

10.1.- CONVERTIDORES BUCK CON MÓDULO LM2596

Dentro de los convertidores con módulo LM2596, tenemos 3 configuraciones diferentes en el laboratorio donde se realizan las prácticas.

Comenzaremos analizando el datasheet del módulo para conocer en profundidad el funcionamiento de este y así poder trabajar con él una vez obtenidos los conocimientos necesarios para realizar medidas sobre él.

Comenzaremos por el rango de funcionamiento del regulador LM2596 en cuanto a las tensiones, que, según la versión del dispositivo de voltaje ajustable es de un voltaje de entrada mínimo de 4.5 V y un voltaje de entrada máximo de 40 V. En cuanto al voltaje de salida este estará comprendido entre 1.2 V y 35 V con una variación de $\pm 4\%$. Para las corrientes, dispone de una corriente de carga comprendida entre 0.2 A y 3 A. Además, su rango de funcionamiento varía según las características eléctricas del dispositivo como pueden ser para la versión 3.3-V, 5-V o 12-V.

Seguiremos analizando su diagrama de bloques interno (Figura 79), donde podemos ver los pines de salida del regulador. El pin Vin (1) se utiliza para alimentar el regulador, mientras que el pin Output (2) proporciona la tensión de salida. GND (3) se refiere al pin

de tierra. El pin FEEDBACK (4) permite ajustar el sistema según las variaciones de tensión de salida y potenciómetro. Por último, el pin ON/OFF (5) controla la conmutación del circuito utilizando señales lógicas. Si su tensión es inferior a 1.3 V, activa el regulador; si es superior, lo desactiva. En caso de no necesitar esta función, se puede conectar a tierra o dejarlo en abierto.

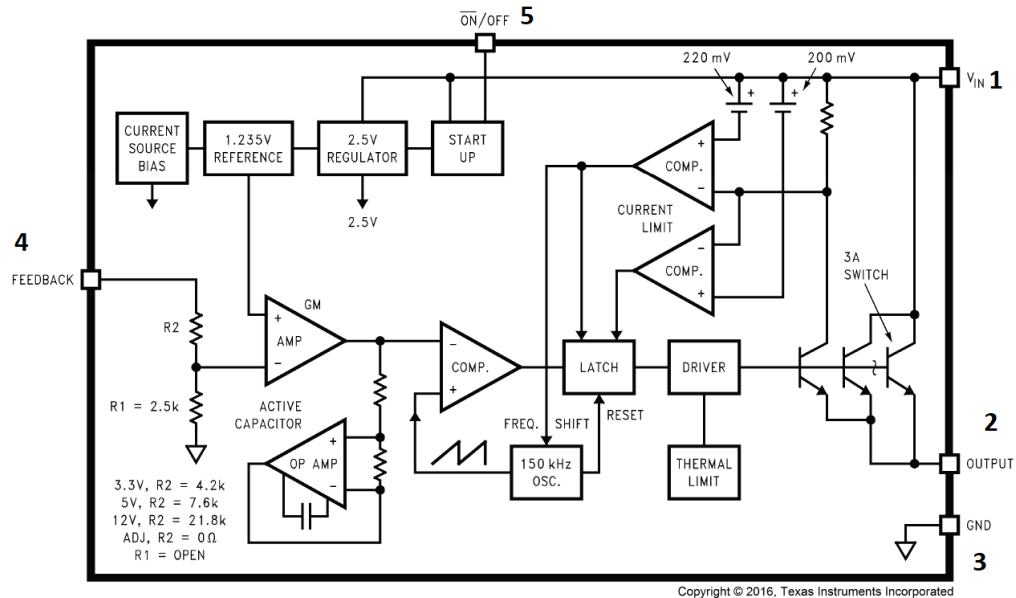


Figura: 79 Diagrama de bloques del módulo LM2596

Una vez vistos los pines del regulador describiremos las funciones del diagrama de bloques.

El pin ON/OFF conectado a tierra asegura el funcionamiento constante del regulador. El bloque de START UP regula la operación del regulador según la tensión en este pin. La entrada de tensión pasa a través de un regulador que proporciona 2,5 V, luego se ajusta a 1.2 V mediante un bloque de referencia antes de ingresar al circuito comparador. Este último recibe también una tensión modificada por un potenciómetro desde el pin de FEEDBACK. La salida del comparador se estabiliza mediante otro amplificador operacional.

A continuación, la señal se dirige a un comparador donde se compara con una señal de oscilador de 150 kHz. Esta señal, generada por un comparador, se introduce en el bloque LATCH junto con otra señal desde el oscilador para el reseteo.

Después, un bloque de drivers con un limitador térmico controla la potencia disipada. Si la temperatura supera el límite, los drivers se desconectan, apagando el regulador.

Por último, tres BJT controlados por los drivers ajustan la potencia disipada según la tensión de salida. El pin de FEEDBACK y el oscilador definen el ciclo de trabajo de los drivers para activar o desactivar los transistores y ajustar la potencia disipada.

Por último, para realizar las medidas en este módulo para diferentes configuraciones, se usará una resistencia de 10Ω/11W a la salida, por lo que no se ha de superar los

10W. En la entrada colocaremos una resistencia shunt de $1\ \Omega$ para realizar las medidas de tensión en la entrada y además poder obtener la corriente de entrada al circuito. Además de las medidas de entrada y salida del convertidor realizaremos medidas con el osciloscopio para ver las formas de onda de la señal PWM y así ver su ciclo de trabajo. En la Figura 80 se muestra donde se realizarán las medidas con el osciloscopio para obtener sus formas de onda.

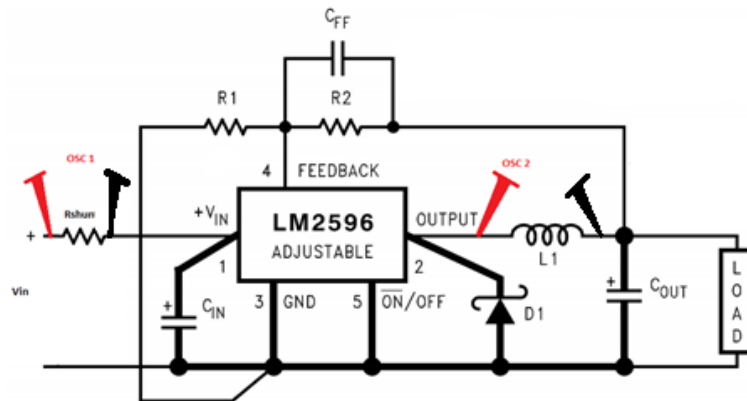


Figura: 80 Zonas de medida con el osciloscopio en el convertidor LM2595

10.1.1.- REGULADOR 3A SIN DISPLAY

Este regulador (Figura 81) ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo de las prácticas dentro del marco de la asignatura de electrónica de potencia hasta la fecha. Su utilización ha sido fundamental para recopilar datos relevantes y llevar a cabo las prácticas necesarias con el objetivo de identificar los problemas y evaluar las posibles soluciones.

Al aprovechar este componente, los estudiantes han tenido la oportunidad de explorar de manera práctica los conceptos teóricos aprendidos en el aula, pudiendo realizar mediciones, análisis y ajustes en tiempo real. Este enfoque práctico no solo refuerza la comprensión de los principios fundamentales de la electrónica de potencia, sino que también proporciona una invaluable experiencia en la resolución de problemas reales.

Es importante destacar que este regulador está disponible en plataformas comerciales a un precio sorprendentemente accesible, aproximadamente 0.85 € por unidad. Esta asequibilidad facilita su adquisición tanto para instituciones educativas como para estudiantes individuales, ampliando así el acceso a herramientas de aprendizaje efectivas en el campo de la electrónica de potencia.

En el transcurso de esta investigación, comenzaremos examinando el modelo específico de este regulador, destacando sus características técnicas. Posteriormente, nos sumergiremos en un análisis de los resultados obtenidos a través de la realización de prácticas, tanto con la participación activa de los alumnos como en condiciones controladas sin su intervención directa.

Este enfoque nos permitirá evaluar de manera integral el rendimiento y la eficacia del regulador en diferentes contextos de enseñanza y aprendizaje. Además, nos brindará

información valiosa sobre su capacidad para facilitar la comprensión de conceptos clave, así como su utilidad en la resolución de problemas prácticos relacionados con sistemas de potencia.

Comenzaremos viendo el modelo y sus características y acabaremos viendo los resultados que se han obtenido realizando las prácticas

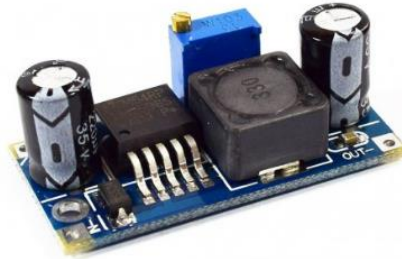


Figura: 81 Convertidor LM2595

Las especificaciones más importantes que podemos ver en el datasheet son las siguientes:

- Tensión de entrada V_{in} de entre 4,5 y 35 V.
- Tensión de salida V_{out} ajustable entre 1,25 y 30 V.
- Corriente de salida I_{out} máxima de 3 A (con disipador de calor externo), 2 A sin disipador.
- Frecuencia de conmutación de 150 Hz
- Eficiencia de conversión máxima del 92 %

En las Figuras 82 y 83 se presenta el equivalente del regulador Buck basado en el circuito integrado LM2596 donde se puede apreciar la configuración de la placa con los distintos componentes que la integran.

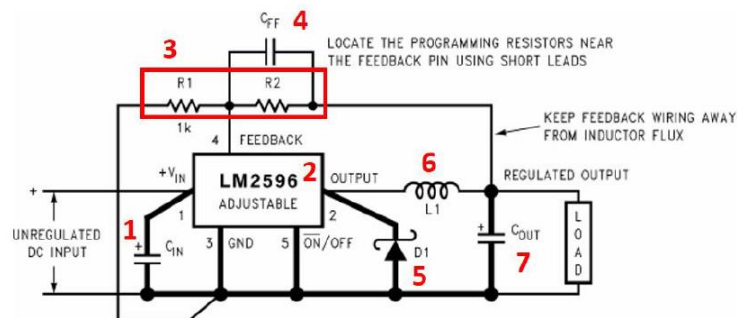


Figura: 82 Circuito interno e identificación de componentes del LM2596

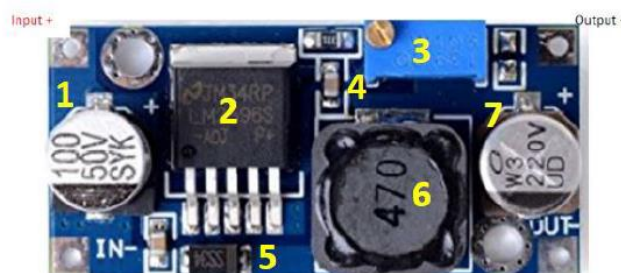


Figura: 83 Placa LM2596 para identificación de componentes

- Convertidor LM2596 (2), en este caso en un en capsulado 5-pin TO-263.
- Condensadores de entrada y salida electrolíticos (1 y 7), con valores de 100 μ F y 50 V.
- Bobina (6), con un valor de 47 μ H.
- Diodo rectificador Schottky (5), en este caso el modelo SS34. Este diodo puede aguantar una corriente máxima directa de 3 A y una tensión inversa repetitiva de 40 V.
- Un potenciómetro (3), que regula la tensión de salida. Éste en concreto tiene un valor máximo de 10 K Ω .
- Resistencia de 1k conectada al potenciómetro que ajustará la salida.

Este regulador se utiliza actualmente en las prácticas de la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" por lo que se han realizado las prácticas y comprobado su funcionamiento obteniendo los valores de salida mediante un multímetro para comprobar el rendimiento del convertidor (tabla 3).

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_{exp} (W)	η_{exp}
15,09	1,259	0,011	0,041	0,126	0,121	0,159	0,152	0,246
15,09	1,977	0,026	0,061	0,198	0,187	0,391	0,370	0,405
15,09	3,042	0,062	0,099	0,304	0,029	0,925	0,088	0,059
15,09	4,280	0,122	0,174	0,428	0,410	1,832	1,756	0,670
15,09	5,240	0,183	0,242	0,524	0,501	2,746	2,625	0,718
15,09	6,200	0,256	0,326	0,620	0,592	3,844	3,670	0,746
15,09	7,220	0,348	0,432	0,722	0,690	5,213	4,982	0,764
15,09	8,200	0,448	0,545	0,820	0,779	6,724	6,388	0,777
15,09	9,120	0,554	0,682	0,912	0,868	8,317	7,916	0,769
15,09	9,800	0,640	0,969	0,980	0,932	9,604	9,134	0,625

Tabla 2: Valores experimentales y teóricos del convertidor LM2596

Una vez obtenidos los valores de corriente y tensión de entrada y salida, realizaremos una representación mediante graficas de la corriente de entrada (Figura 84), salida (Figura 85) y la potencia (Figura 86) respecto a la tensión de salida, además tambien representaremos el rendimiento (Figura 87) para ver los resultados de manera más visual.

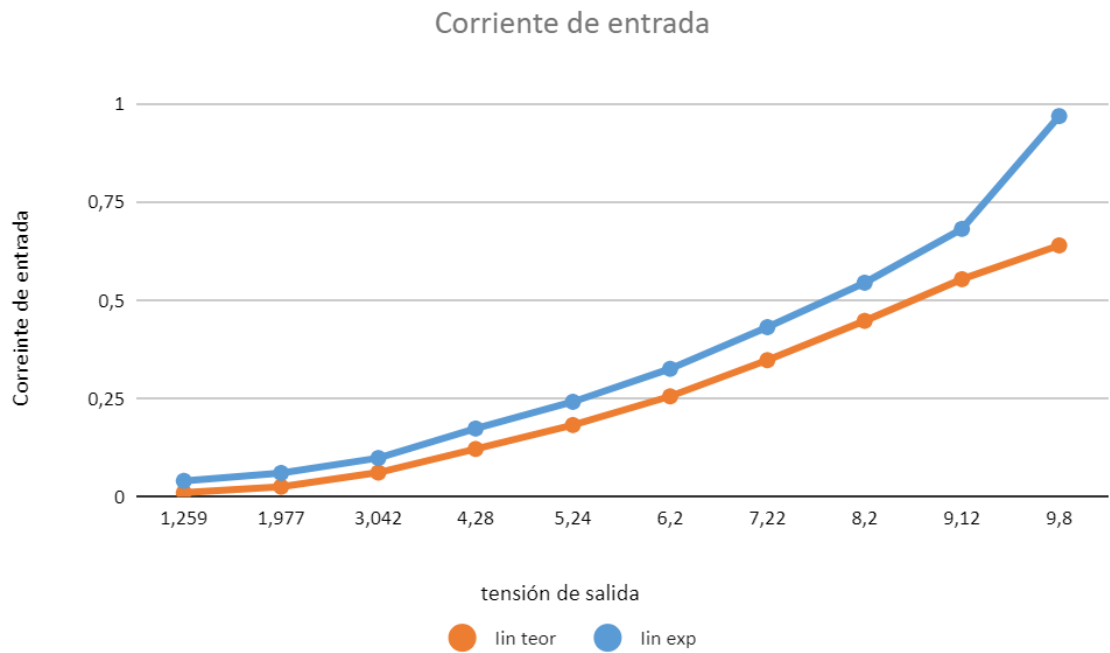


Figura: 84 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

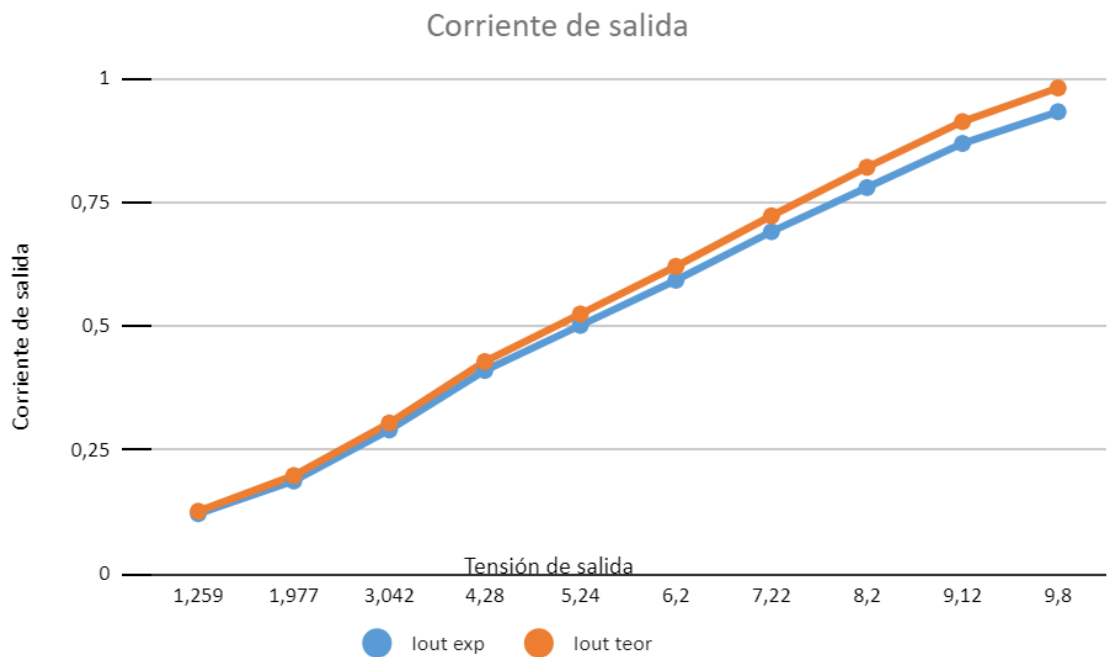


Figura: 85 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

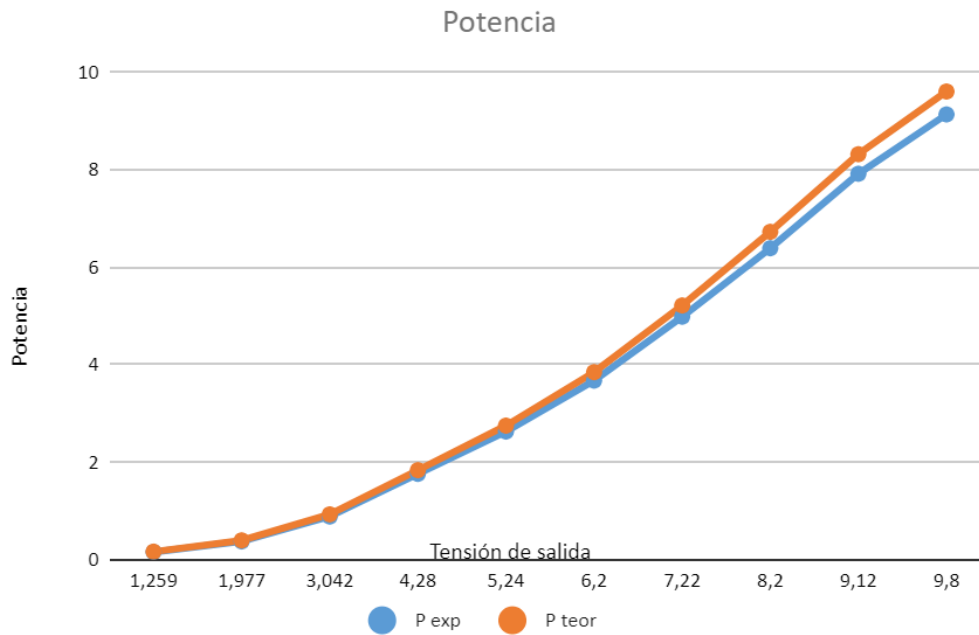


Figura: 86 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

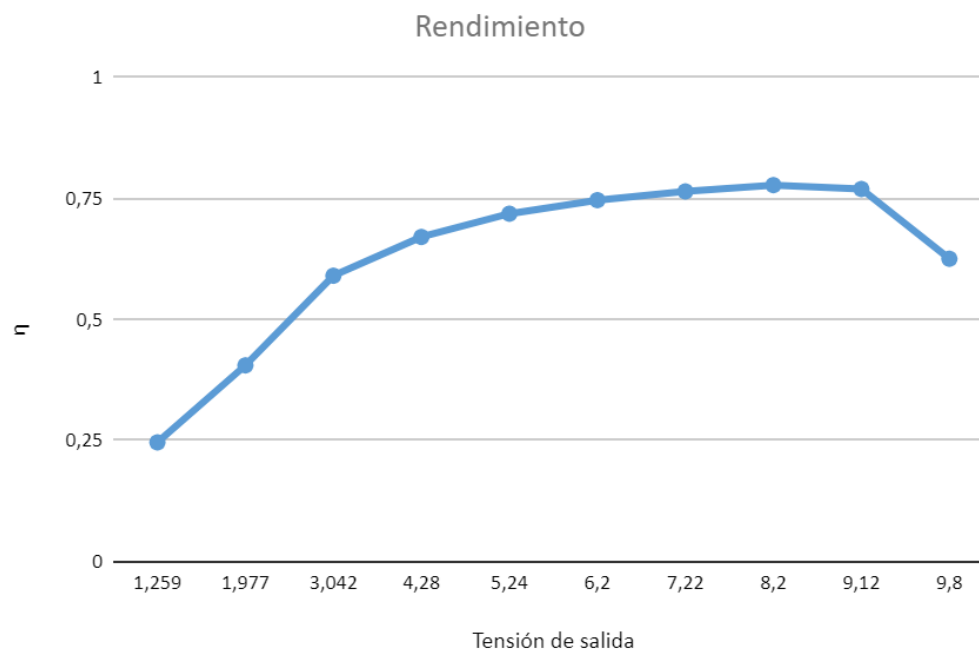


Figura: 87 Eficiencia del circuito respecto a la tensión de salida

Para terminar, realizaremos medidas con el osciloscopio de las formas de onda de la tensión de entrada y salida del regulador a diferentes voltajes de salida para ver la señal PWM que se aprecia en la bobina y la tensión de entrada que será equiparable a la corriente de entrada al tener una resistencia shunt de 1Ω .

En la siguiente grafica (Figura 88), tenemos una tensión en la bobina de pico a pico de 15,6V a una frecuencia de 57,37 KHz y una corriente de entrada de 728mA como máximo, esta grafica se ha realizado para un ciclo de trabajo del 40% aproximadamente obteniendo asi el tiempo en off y en on de la señal PWM que nos proporciona el regulador.

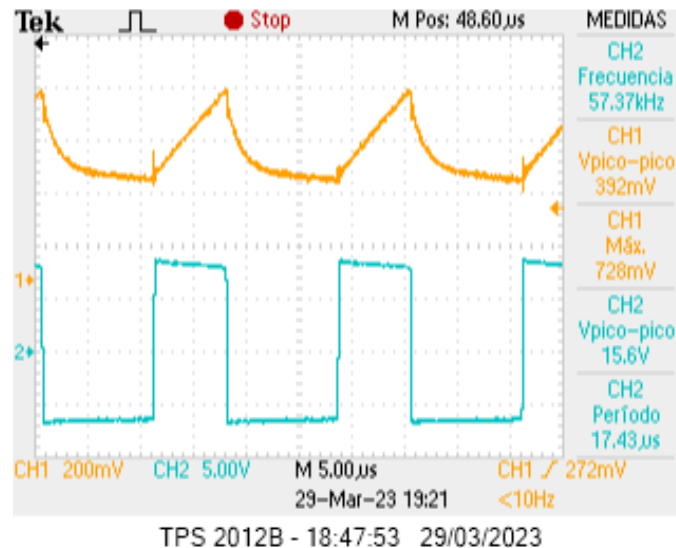


Figura: 88 Ciclo de trabajo al 40% del módulo LM2596 sin display

En la siguiente grafica (Figura 89), tenemos una tensión en la bobina de pico a pico de 14.6V a una frecuencia de 27.34 KHz y una corriente de entrada de 1.98A como máximo, esta grafica se ha realizado para un ciclo de trabajo del 40% aproximadamente obteniendo asi el tiempo en off y en on de la señal PWM que nos proporciona el regulador.

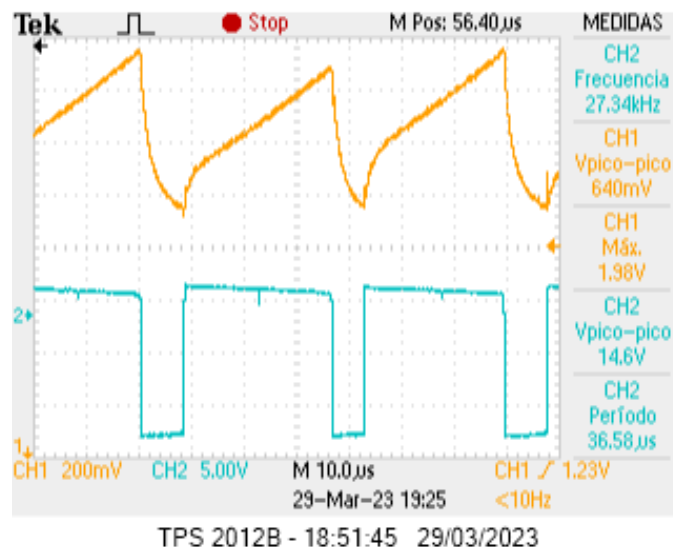


Figura: 89 Ciclo de trabajo al 80% del módulo LM2596 sin display

10.1.2.- REGULADOR DE VOLTAJE 3A CON DISPLAY Y CONTROLES DE USUARIO INTEGRADOS

Este regulador (Figura 90) ha sido utilizado en las prácticas de la asignatura de electrónica de potencia hasta el momento. Por lo que se han podido recoger datos y realizar las prácticas para ver los problemas que hay dentro de ellas y analizar las posibles soluciones. Podemos encontrar este módulo por un precio de aproximadamente 1.05 € por unidad, por lo que es un precio un poco mayor que el modelo sin display, pero que con el display puede ser una muy buena opción para facilitar el aprendizaje y entendimiento de los alumnos

Comenzaremos viendo el modelo y sus características y acabaremos viendo los resultados que se han obtenido realizando las prácticas.



Figura: 90 Regulador LM2596 con display y botones

Éste es un regulador tipo Buck que hace uso del convertidor LM2596 de Texas Instruments. Como extras, posee una pequeña pantalla LED por la cual se puede mostrar la tensión de entrada o de salida según pulsemos el botón IN o OUT.

Las especificaciones de este conversor son las siguientes:

- Tensión de entrada V_{in} de entre 4 y 40 V.
- Tensión de salida V_{out} ajustable mediante un potenciómetro entre 1.25 y 37 V.
- Corriente de salida I_{out} máxima de 3 A, aunque para largos periodos de funcionamiento limitarla a 2 A.
- Potencia máxima de salida de 15 W.

En cuanto a los componentes tenemos:

- Condensadores de entrada y salida. En nuestro caso tenemos dos condensadores electrolíticos de 220 μ F y 35 V.

- Bobina de 100 μ H.
- Convertidor LM2596, en este caso en un encapsulado 5-pin TO-263.
- Dos diodos rectificadores Schottky, en este caso el modelo SS34. Este diodo puede aguantar una corriente máxima directa de 3 A y una tensión inversa repetitiva de 40 V. En principio el circuito básico del convertidor reductor solo requiere de un diodo rectificador, por lo que el otro corresponde a la parte del LED y los botones.
- Dos pulsadores para que el usuario pueda controlar la pantalla LED.

Este regulador se utiliza actualmente en las prácticas de la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" por lo que se han realizado las prácticas y comprobado su funcionamiento obteniendo los valores de salida mediante un multímetro para comprobar el rendimiento del convertidor (tabla 4).

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_{exp} (W)	η_{exp}
15,090	1,257	0,011	0,020	0,126	0,122	0,158	0,154	0,499
15,090	2,830	0,053	0,060	0,283	0,267	0,801	0,756	0,832
15,090	4,500	0,135	0,167	0,450	0,436	2,025	1,962	0,779
15,090	5,920	0,234	0,277	0,592	0,572	3,505	3,386	0,810
15,090	7,600	0,385	0,446	0,760	0,738	5,776	5,609	0,833
15,090	8,770	0,513	0,590	0,877	0,852	7,691	7,472	0,839
15,090	9,900	0,653	0,763	0,990	0,940	9,801	9,306	0,808

Tabla 3 Valores experimentales y teóricos del convertidor LM2596 con display y 2 pulsadores

Una vez obtenidos los valores de corriente y tensión de entrada y salida, realizaremos una representación mediante graficas de la corriente de entrada (Figura 91), salida (Figura 92) y la potencia (Figura 93) respecto a la tensión de salida, además también representaremos el rendimiento (Figura 94) para ver los resultados de manera más visual.

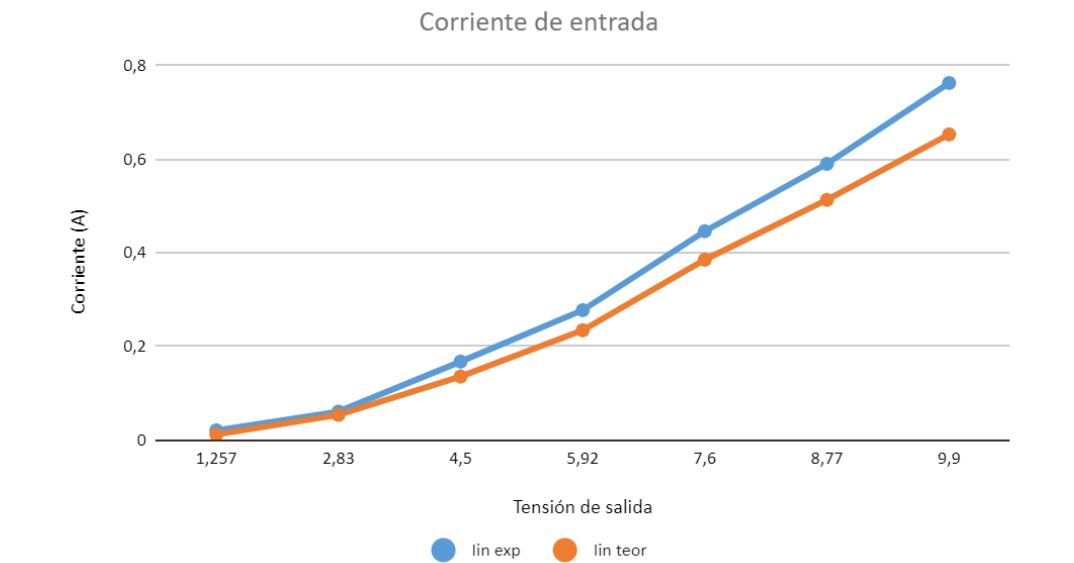


Figura: 91 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

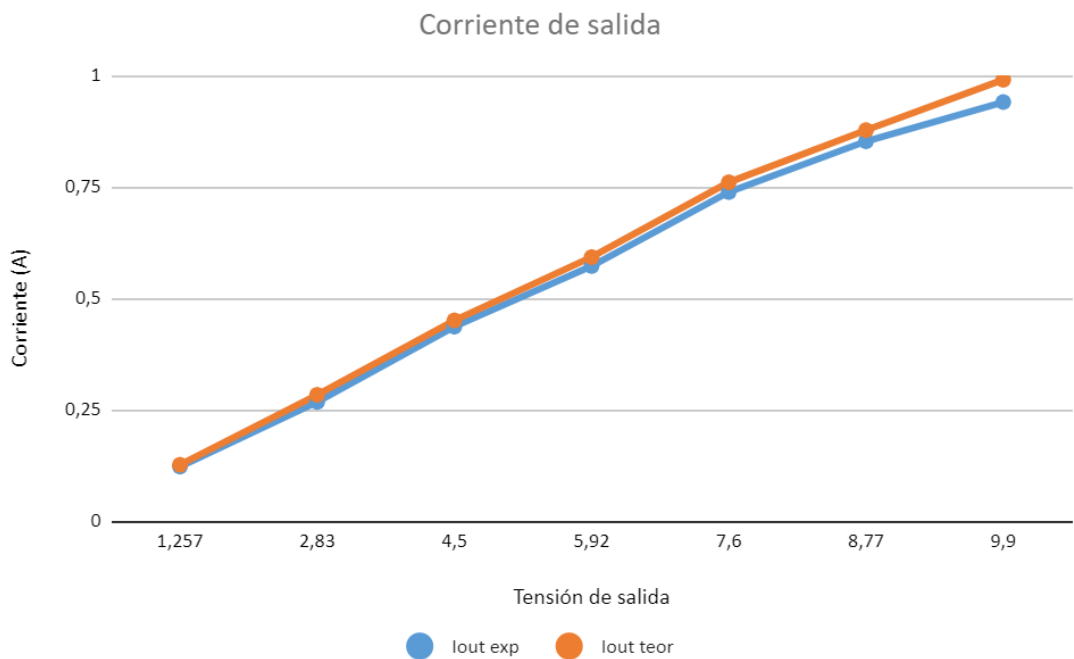


Figura: 92 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

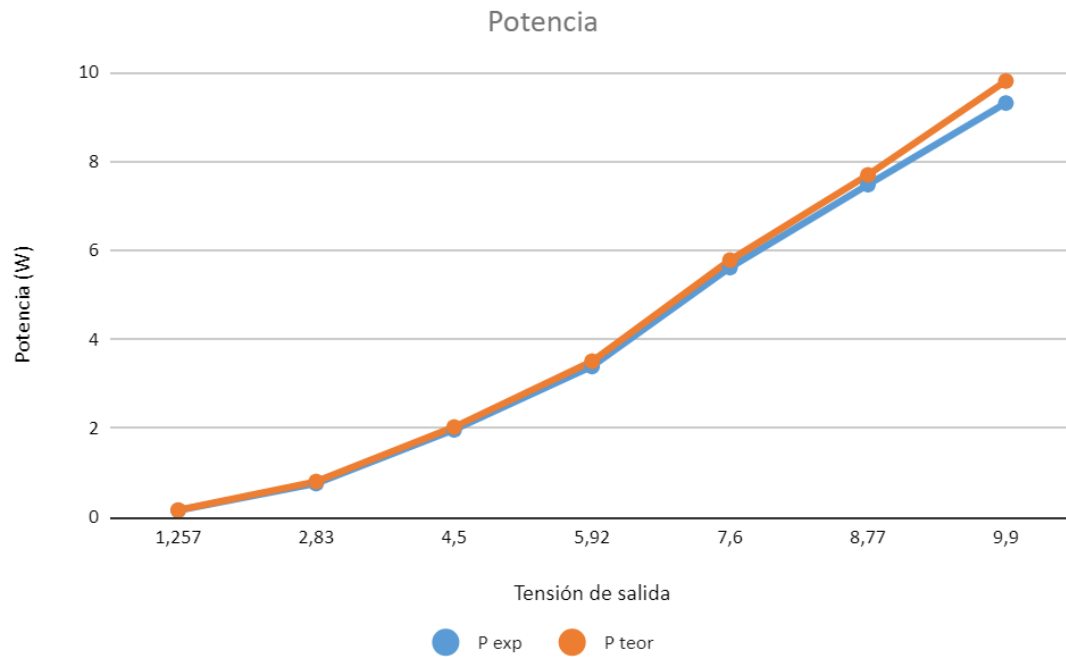


Figura: 93 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

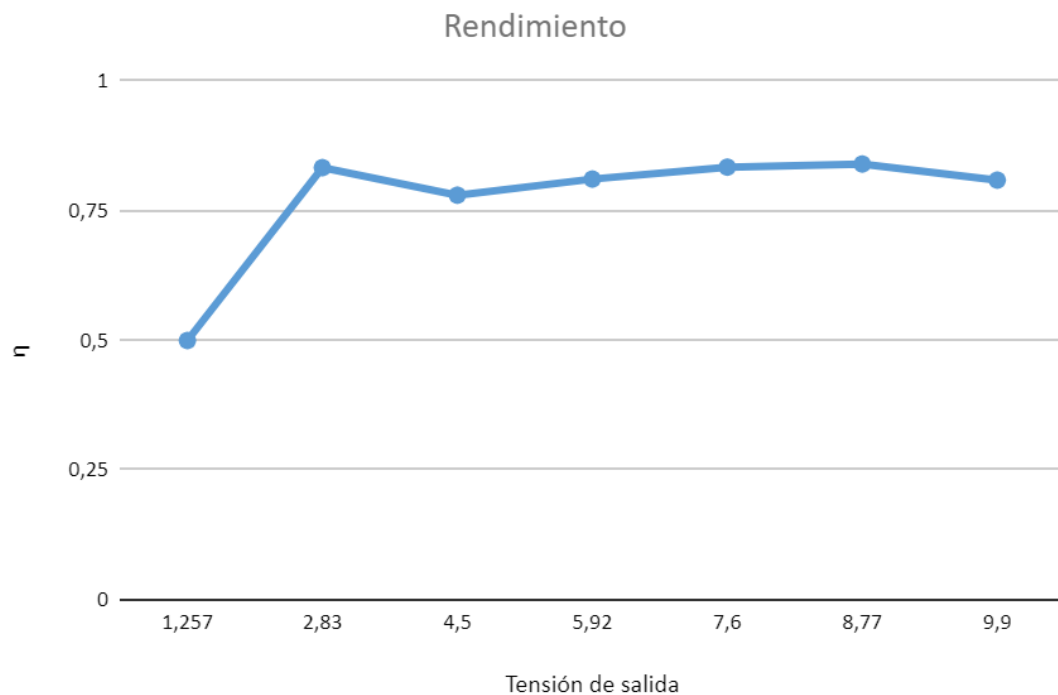


Figura: 94 Eficiencia respecto a la tensión de salida

Para terminar, realizaremos medidas con el osciloscopio de las formas de onda de la tensión de entrada y salida del regulador a diferentes voltajes de salida para ver la señal PWM que se aprecia en la bobina y la tensión de entrada que será equiparable a la corriente de entrada al tener una resistencia shunt de 1Ω .

En la siguiente grafica (Figura 95), tenemos una tensión en la bobina de pico a pico de 15,8V a una frecuencia de 93.86 KHz y una corriente de entrada de 712mA como máximo, esta grafica se ha realizado para un ciclo de trabajo del 40% aproximadamente obteniendo asi el tiempo en Off y en On de la señal PWM que nos proporciona el regulador. Se puede apreciar un poco de rizado en la señal a la salida de la bobina debido a que la capacidad equivalente del diodo se carga a través del condensador de salida y produce una discontinuidad de la corriente.

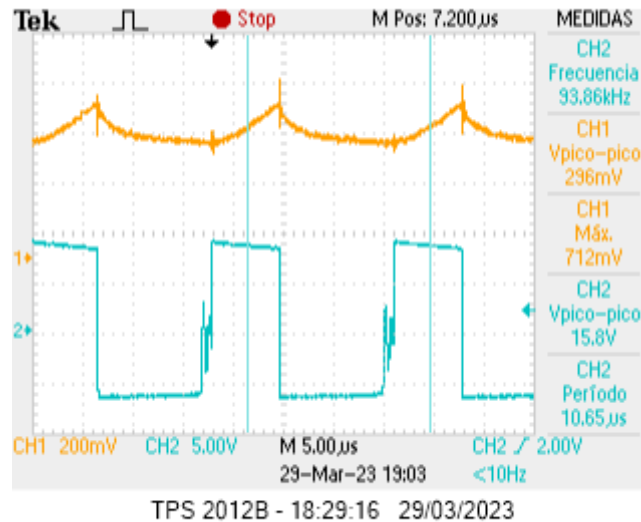


Figura: 95 Ciclo de trabajo al 40% del módulo LM2596 sin display

En la siguiente grafica (Figura 96), tenemos una tensión en la bobina de pico a pico de 15,2V a una frecuencia de 66.98 KHz y una corriente de entrada de 2.1A como máximo, esta grafica se ha realizado para un ciclo de trabajo del 40% aproximadamente obteniendo asi el tiempo en Off y en On de la señal PWM que nos proporciona el regulador.

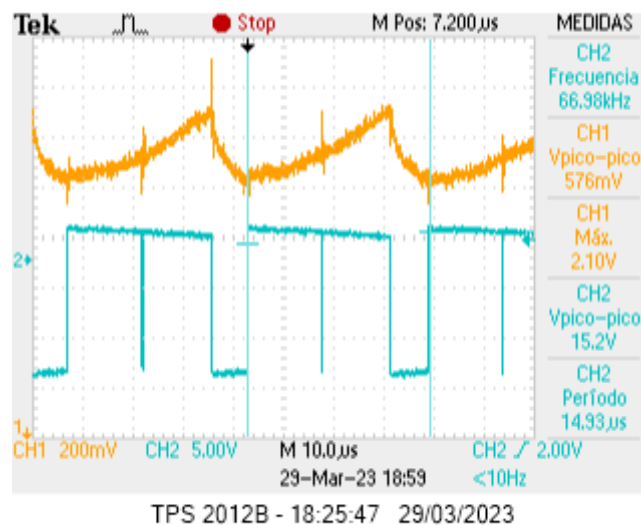


Figura: 96 Ciclo de trabajo al 80% del módulo LM2596 sin display

10.1.3.- REGULADOR DE VOLTAJE DROK DE 3A CON DISPLAY Y CONTROLES DE USUARIO INTEGRADOS

Este regulador (Figura 97) ha sido utilizado en las prácticas de la asignatura de electrónica de potencia hasta el momento. Por lo que se han podido recoger datos y realizar las prácticas para ver los problemas que hay dentro de ellas y analizar las posibles soluciones. Venta actualmente no disponible, pero si se pueden encontrar módulos convertidores de características similares.

Comenzaremos viendo el modelo y sus características y acabaremos viendo los resultados que se han obtenido realizando las prácticas.

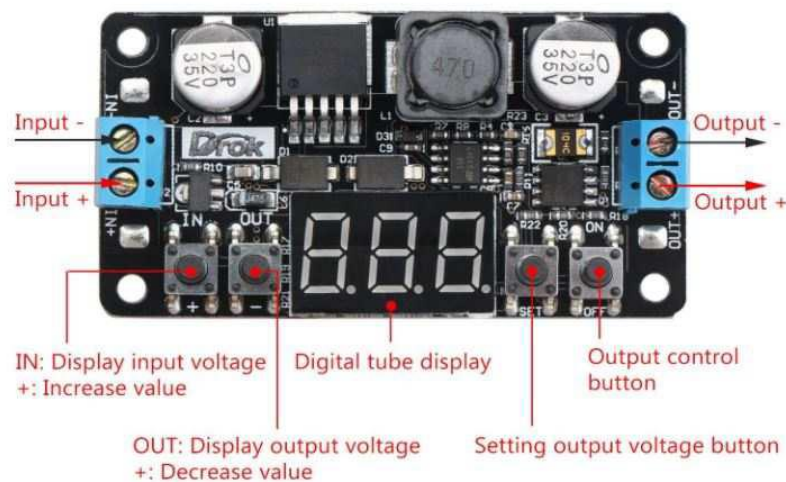


Figura: 97 Regulador LM2596 configuración con display y 4 botones

Éste es un regulador tipo Buck que hace uso del convertidor LM2596 de Texas Instruments. Como extras, posee una pequeña pantalla LED por la cual se puede mostrar la tensión de entrada o de salida según los pulsadores IN/OUT. Los otros dos pulsadores sirven para modificar la tensión de salida, como se explicará posteriormente.

Las especificaciones de este conversor son las siguientes:

- Tensión de entrada V_{in} de entre 5 y 35 V.
- Tensión de salida V_{out} ajustable entre 0 y 30 V.
- Corriente de salida I_{out} máxima de 3 A, aunque para largos periodos de funcionamiento limitarla a 2 A.
- Limitación de potencia interna con autoapagado.

En cuanto a los componentes tenemos:

- Condensadores de entrada y salida. En nuestro caso tenemos dos condensadores electrolíticos de 330 μ F y 35 V.
- Bobina de 47 μ H.
- Convertidor LM2596, en este caso en un encapsulado 5-pin TO-263.
- Dos diodos rectificadores Schottky, en este caso el modelo SS510. Este diodo puede aguantar una corriente máxima directa de 5 A y una tensión inversa de 100 V. En principio el circuito básico del convertidor reductor solo requiere de un diodo rectificador, por lo que el otro corresponde a la parte del LED y los pulsadores.
- Dos pares de pulsadores para que el usuario pueda controlar la pantalla LED.

Los pulsadores del lado izquierdo, que llevan escrito IN y OUT en la parte superior sirven para mostrar en pantalla o bien la entrada o bien la salida respectivamente.

Además, si previamente se ha pulsado el botón de SET del lado derecho, cambiará su funcionamiento y el que previamente era IN ahora pasará a elevar la tensión de salida, mientras que el que era OUT ahora pasará a reducir la tensión de salida.

Por otra parte, en el lado derecho tenemos el pulsador de SET, que ya mencionamos anteriormente y solo sirve para funcionar en conjunto con IN y OUT para elevar o reducir la tensión de salida y el pulsador de OFF con el cual apagamos el convertidor, obteniendo a la salida 0 V.

Este regulador se utiliza actualmente en las prácticas de la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" por lo que se han realizado las prácticas y comprobado su funcionamiento obteniendo los valores de salida mediante un multímetro para comprobar el rendimiento del convertidor (tabla 5).

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_{exp} (W)	η_{exp}
15,110	0,862	0,005	0,026	0,086	0,080	0,074	0,069	0,175
15,110	1,940	0,025	0,052	0,194	0,183	0,376	0,355	0,454
15,110	3,950	0,104	0,139	0,395	0,369	1,560	1,458	0,695
15,110	5,950	0,236	0,274	0,595	0,533	3,540	3,171	0,765
15,110	7,700	0,395	0,463	0,770	0,706	5,929	5,436	0,777
15,110	9,970	0,663	0,763	0,997	0,924	9,940	9,212	0,799
15,110	10,770	0,773	0,890	1,077	0,980	11,599	10,555	0,785

Tabla 4 Valores experimentales y teóricos del convertidor LM2596 con display y 4 pulsadores

Una vez obtenidos los valores de corriente y tensión de entrada y salida, realizaremos una representación mediante graficas de la corriente de entrada (Figura 98), salida (Figura 99) y la potencia (Figura 100) respecto a la tensión de salida, además tambien representaremos el rendimiento (Figura 101) para ver los resultados de manera más visual.

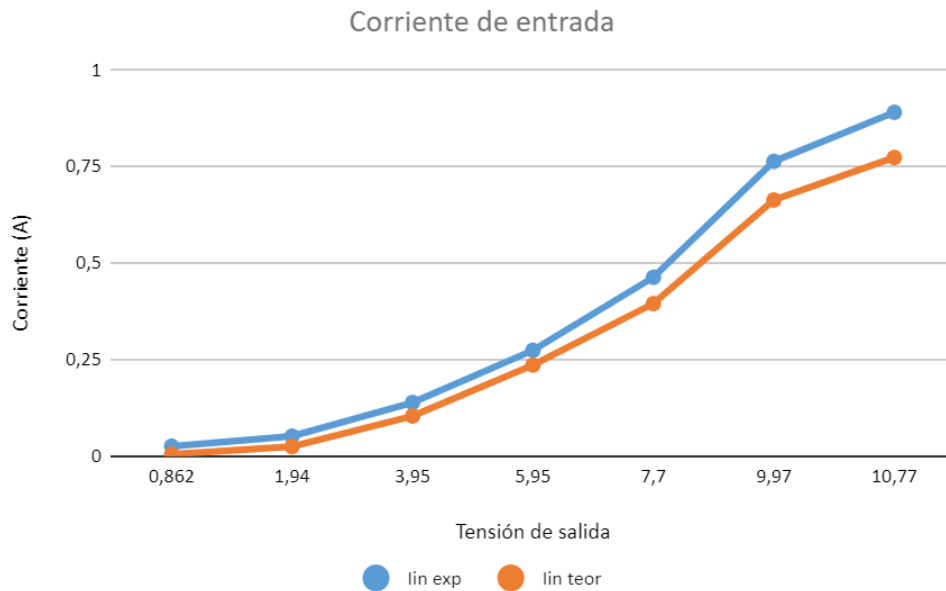


Figura: 98 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

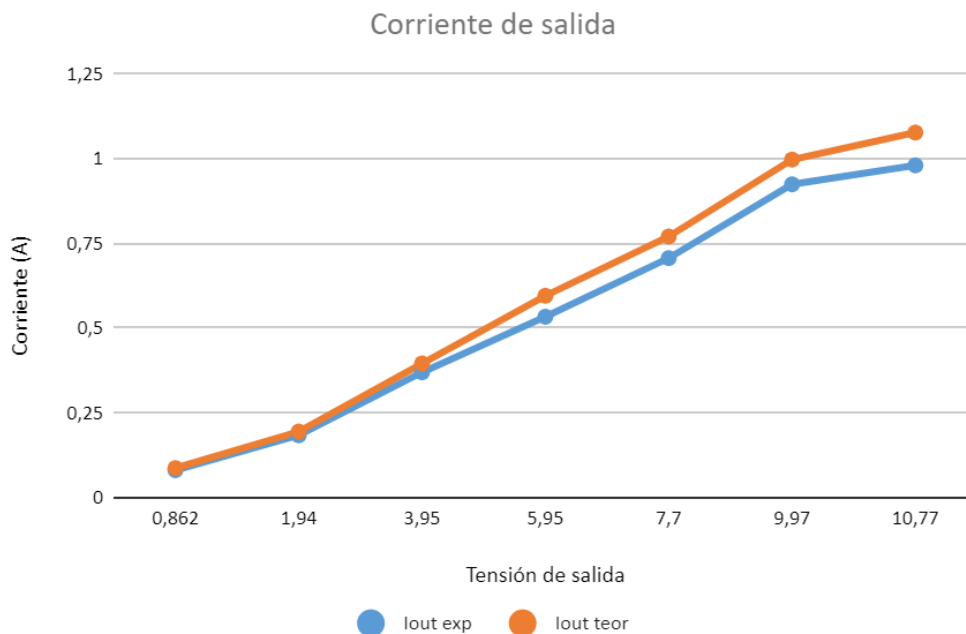


Figura: 99 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

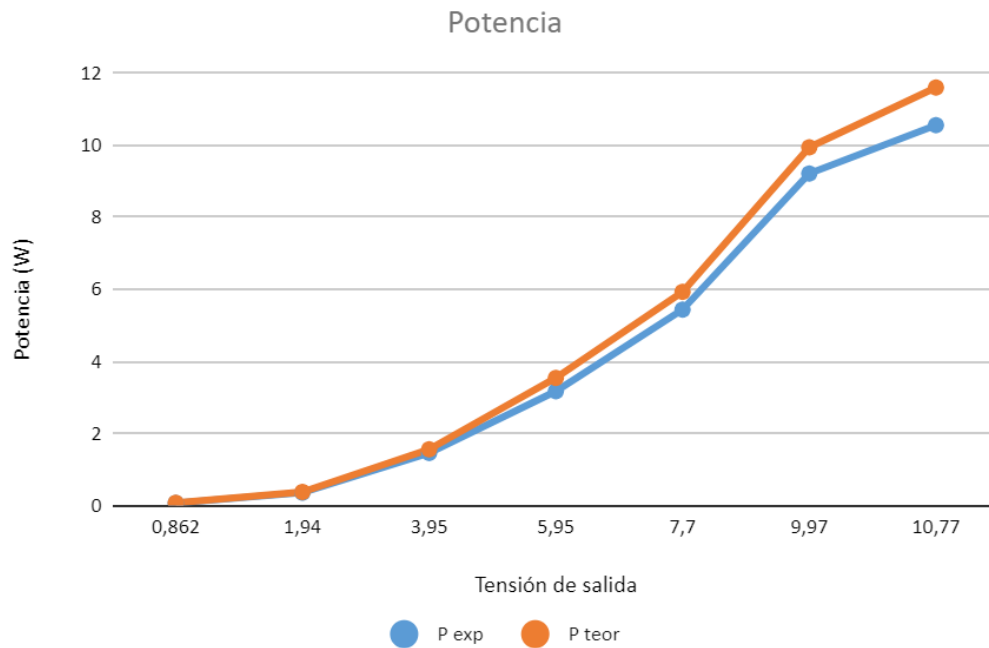


Figura: 100 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

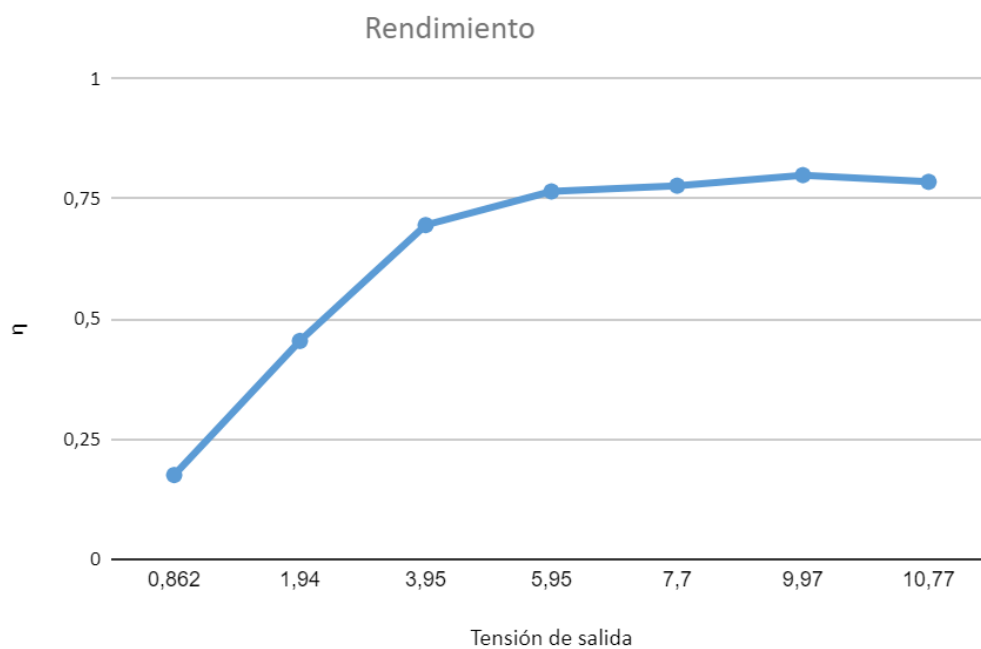


Figura: 101 Eficiencia respecto a la tensión de salida

Para terminar, realizaremos medidas con el osciloscopio de las formas de onda de la tensión de entrada y salida del regulador a diferentes voltajes de salida para ver la señal PWM que se aprecia en la bobina y la tensión de entrada que será equiparable a la corriente de entrada al tener una resistencia shunt de 1Ω .

En la siguiente grafica (Figura 102), tenemos una tensión en la bobina de pico a pico de 15,6V a una frecuencia de 152.3 KHz y una corriente de entrada de 2.1A como máximo, esta grafica se ha realizado para un ciclo de trabajo del 40% aproximadamente obteniendo asi el tiempo en off y en on de la señal PWM que nos proporciona el regulador.

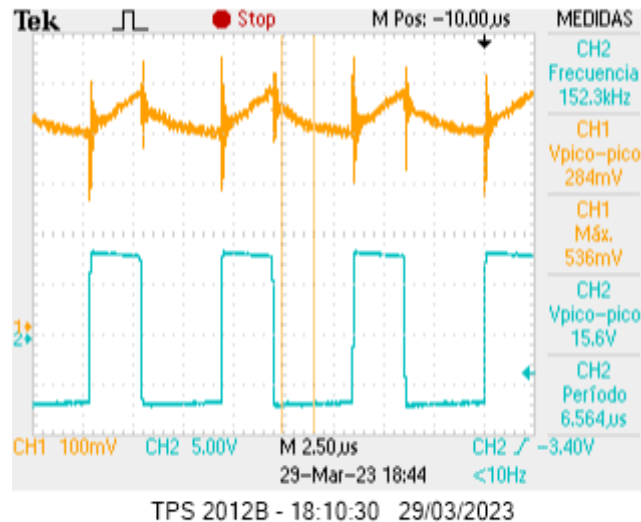


Figura: 102 Ciclo de trabajo al 40% del módulo LM2596 sin display

En la siguiente grafica (Figura 103), tenemos una tensión en la bobina de pico a pico de 14.6V a una frecuencia de 152.2 KHz y una corriente de entrada de 1.66A como máximo, esta grafica se ha realizado para un ciclo de trabajo del 80% aproximadamente obteniendo asi el tiempo en off y en on de la señal PWM que nos proporciona el regulador.

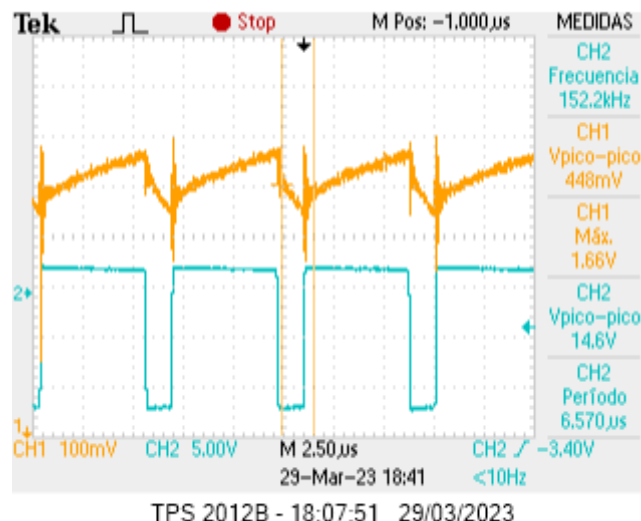


Figura: 103 Ciclo de trabajo al 80% del módulo LM2596 sin display

10.2.- CONVERTIDOR BOOST XL6009

Este regulador (Figura 104) ha sido utilizado en las prácticas de la asignatura de electrónica de potencia hasta el momento. Por lo que se han podido recoger datos y realizar las prácticas para ver los problemas que hay dentro de ellas y analizar las posibles soluciones. Podemos encontrar este módulo por un precio de aproximadamente 1.60 € por unidad.

Este modelo ha sido anteriormente analizado en el trabajo de Adrián Polo [4], en este trabajo se analizará de nuevo su comportamiento y comprobación de su funcionamiento, además de estar con los alumnos para ver las dificultades que se presentan durante la realización de la práctica.

El módulo XL6009 es otro tipo de regulador de voltaje y corriente DC-DC ampliamente utilizado en proyectos electrónicos. A diferencia del MT3608 y del XL4015, el XL6009 está diseñado específicamente para aumentar (elevar) el voltaje de entrada a un voltaje de salida más alto, lo que lo convierte en un regulador de tipo Boost. A continuación, se proporciona una descripción detallada de sus características, las cuales describiremos a continuación. <https://www.haoyuelectronics.com/Attachment/XL6009/XL6009-DC-DC-Converter-Datasheet.pdf>

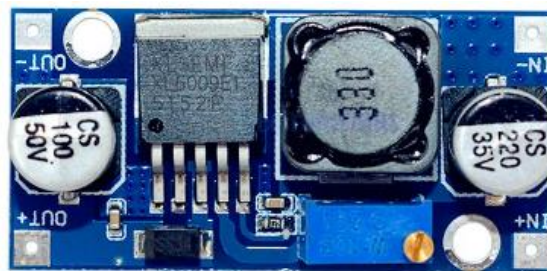


Figura: 104 Regulador Boost XL6009

Empezaremos describiendo sus características principales:

- Tensión de entrada V_{in} de entre 3.6 y 36 V.
- Tensión de salida V_{out} ajustable entre 7 y 35 V.
- Corriente de salida I_{out} máxima de 5 A.
- Potencia de salida de 10W.
- Frecuencia de conmutación de 400 KHz.
- Eficiencia de conversión máxima del 94 %.
- Versión de 1.25V de referencia ajustable.
- Dimensiones: 43mm*20mm*14mm.

- Encapsulado TO263-5L de 5 pines
- Tiene compensación en frecuencia, limitación de corriente, protección contra sobrecalentamiento y un arrancador suave que protege de los daños causados por las entradas repentinas de energía

Siguiendo con el diagrama de bloques de la Figura 105, describiremos las distintas partes y su funcionamiento.

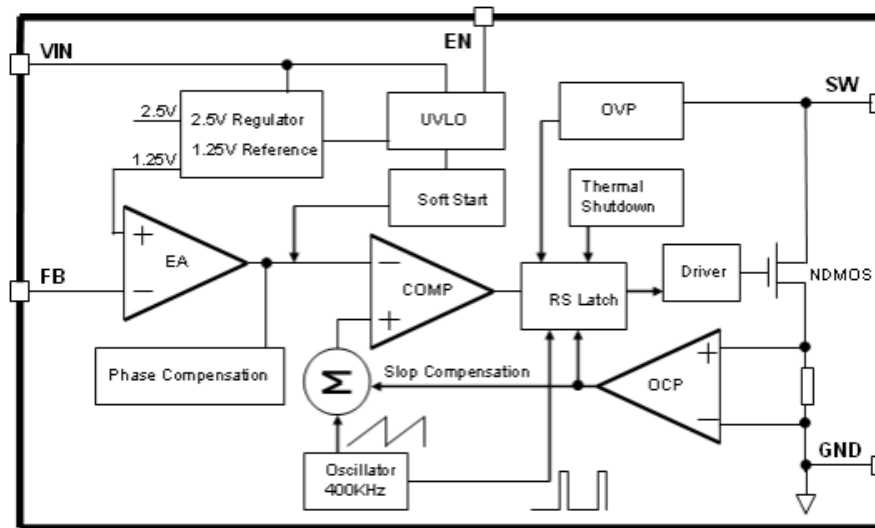


Figura: 105 Diagrama de bloques del módulo XL6009

- Parte de potencia: Esta sección incluye un transistor de alta tensión DMOS que se activa mediante el controlador situado a su izquierda. Su función es ajustar los niveles de corriente de salida según lo indicado por el dispositivo utilizado.
- Circuito comparador: Consiste en un amplificador operacional que, según los valores de resistencia del bloque regulador, ajusta la tensión de salida.
- Circuito de muestreo: Encargado de ajustar la tensión de entrada en el pin V del amplificador operacional.
- Bloque de tensión de referencia: El voltaje de referencia de 1.25V pasa por el circuito comparador, utilizando una corriente que proporciona una referencia constante.

En cuanto al funcionamiento, un potenciómetro ajusta la tensión que ingresa al amplificador desde la patilla de retroalimentación (FEEDBACK). El amplificador operacional estabiliza la tensión de salida, que luego entra al comparador. En la entrada positiva de este comparador llega la señal del oscilador de 400kHz, generada por otro comparador que la introduce en el bloque LATCH. También llega una señal desde el oscilador para restablecer este bloque.

Continuaremos representando el equivalente del regulador Boost XL6009 (Figura 106) donde se puede apreciar la configuración de la placa con los distintos componentes que la integran.

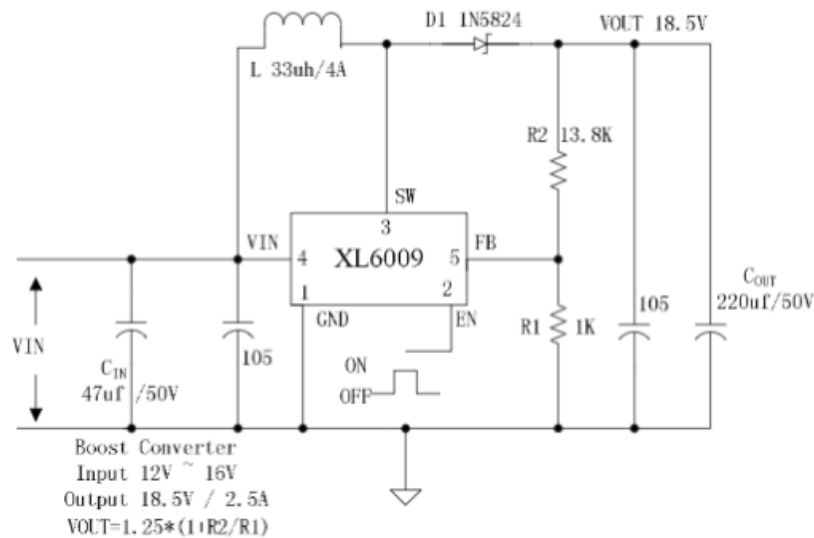


Figura: 106 Circuito interno regulador XL6009

- Convertidor XL6009, en este caso en un en capsulado 5-pin TO-263-5L.
- Condensadores de entrada y salida electrolíticos de 47/220 μ F y 50 V.
- Bobina con un valor de 33 μ H.
- Diodo rectificador Schottky. Este diodo puede aguantar una corriente máxima directa de 3 A y una tensión inversa repetitiva de 40 V.
- Un potenciómetro que hace las veces de carga de salida regulable.
- Resistencia de 1k conectada al potenciómetro que ajustará la salida.

Por último, en la Figura 107 se puede ver el encapsulado que describiremos a continuación:

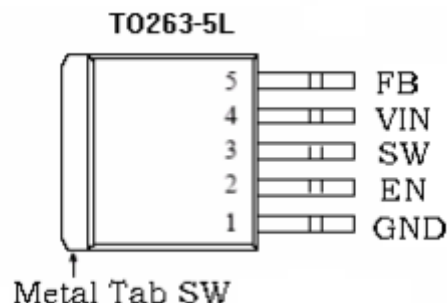


Figura: 107 Encapsulado y pin out del módulo XL6009

1. GND: Pin de Tierra.

2. EN: Pin de Habilitación. Para apagar el dispositivo, se debe mantener bajo (LOW) el nivel de voltaje en el pin EN; para encenderlo, se debe mantener alto (HIGH). En estado flotante, el nivel predeterminado es alto.
3. SW: Pin de Salida del Interruptor de Potencia.
4. VIN: Pin de Entrada de Voltaje de Alimentación. El XL6009 opera con un voltaje de CC de 3.6V a 36V. Derivar VIN a GND con un capacitor lo suficientemente grande para eliminar el ruido en la entrada.
5. FB: Pin de Retroalimentación. A través de una red de división de resistores externa, FB detecta el voltaje de salida y lo regula. El voltaje umbral de retroalimentación es de 1.25V.

Este regulador se utiliza actualmente en las prácticas de la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" por lo que se han realizado las prácticas y comprobado su funcionamiento obteniendo los valores de salida mediante un multímetro para comprobar el rendimiento del convertidor. Para ello se utilizarán las siguientes fórmulas para obtener los valores necesarios y hallar el rendimiento teórico y experimental del convertidor.

Para realizar el circuito se usarán 2 resistencias de $22\Omega/7W$ conectadas en serie a la salida, por lo que no se podrá superar la potencia de 7W a la salida. Para ello sabemos que la potencia de entrada y de salida en este convertidor coincidirán.

$$P_{out,max} = P_{in,max} = V_{in} \cdot I_{in} \quad (8.7)$$

Este regulador se utiliza actualmente en las prácticas de la asignatura "Sistemas Electrónicos e Instrumentación Industrial" por lo que se han realizado las prácticas y comprobado su funcionamiento obteniendo los valores de salida mediante un multímetro para comprobar el rendimiento del convertidor (tabla 6).

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_{exp} (W)	η_{exp}
6,040	7,980	0,241	0,250	0,181	0,280	1,447	2,234	0,648
6,040	10,200	0,394	0,410	0,232	0,320	2,365	3,264	0,724
6,040	12,100	0,555	0,570	0,275	0,360	3,328	4,356	0,764
6,040	13,950	0,737	0,780	0,317	0,380	4,423	5,301	0,834
6,040	16,100	0,982	1,120	0,366	0,430	5,891	6,923	0,851

Tabla 5 Valores experimentales y teóricos del convertidor XL6009 boost

Una vez obtenidos los valores de corriente y tensión de entrada y salida, realizaremos una representación mediante graficas de la corriente de entrada (Figura 108), salida (Figura 109) y la potencia (Figura 110) respecto a la tensión

de salida, además también representaremos el rendimiento (Figura 111) para ver los resultados de manera más visual.

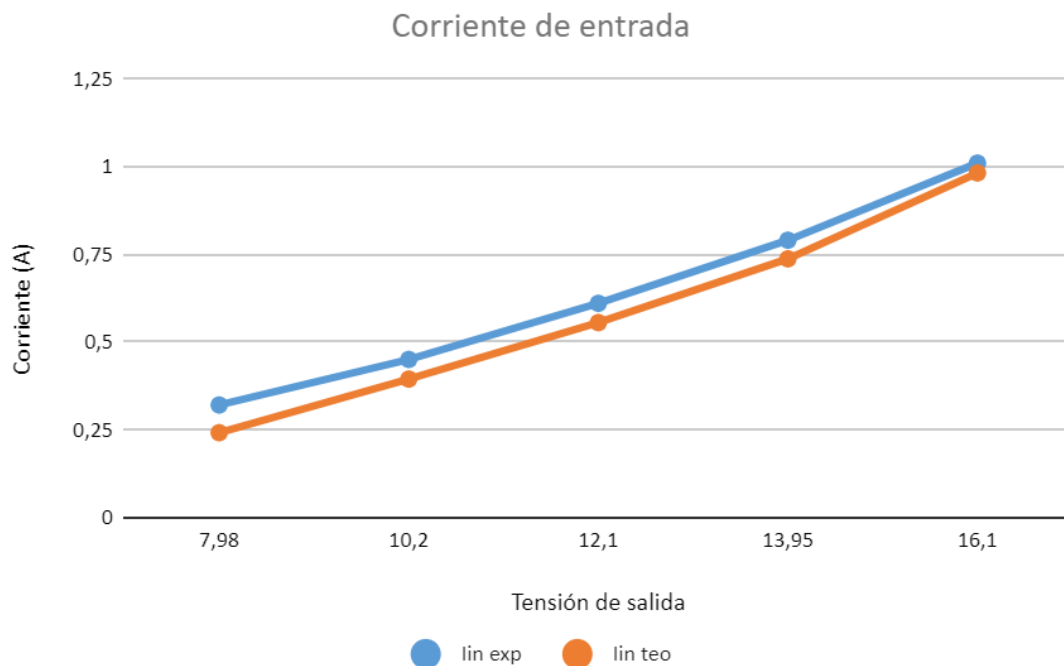


Figura: 108 Corriente de entrada de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

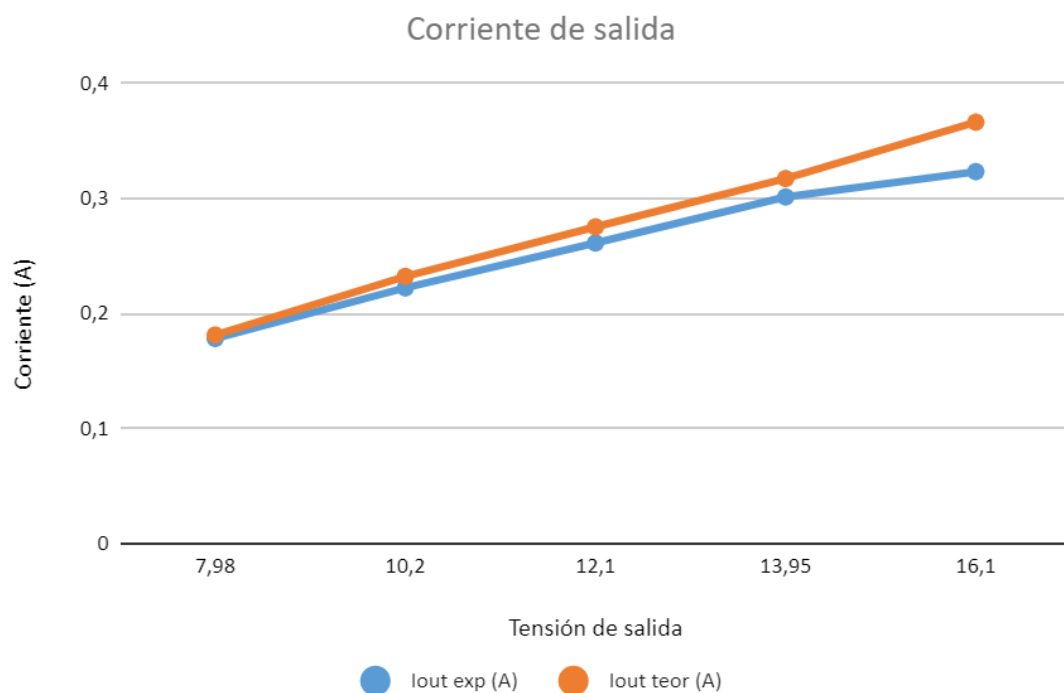


Figura: 109 Corriente de salida de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

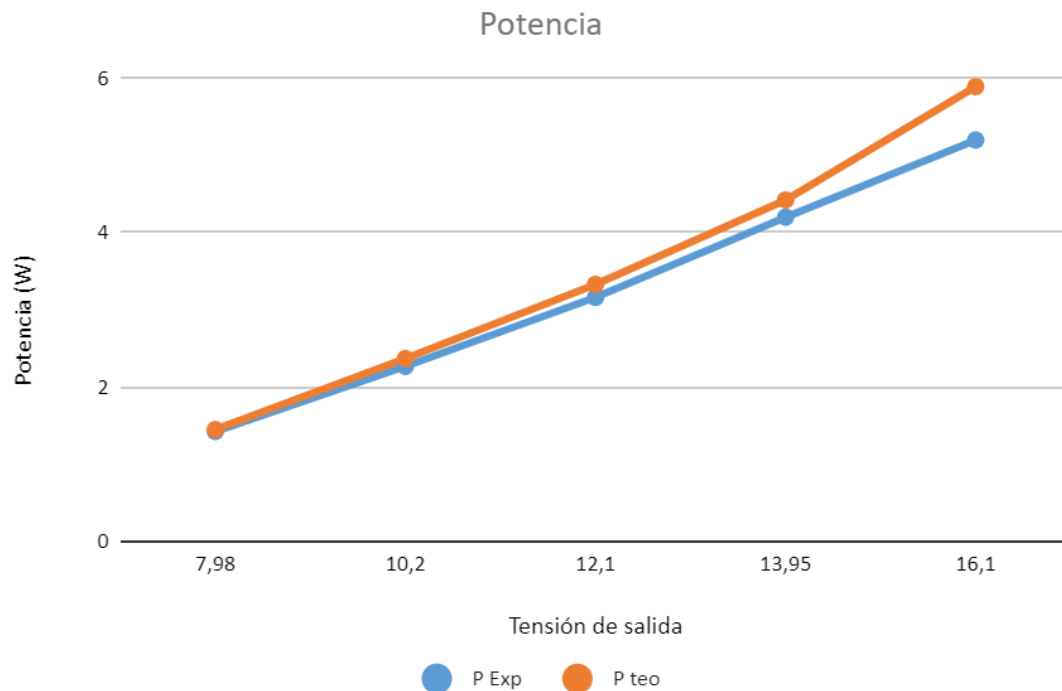


Figura: 110 Potencia de los valores teóricos y prácticos respecto a la tensión de salida

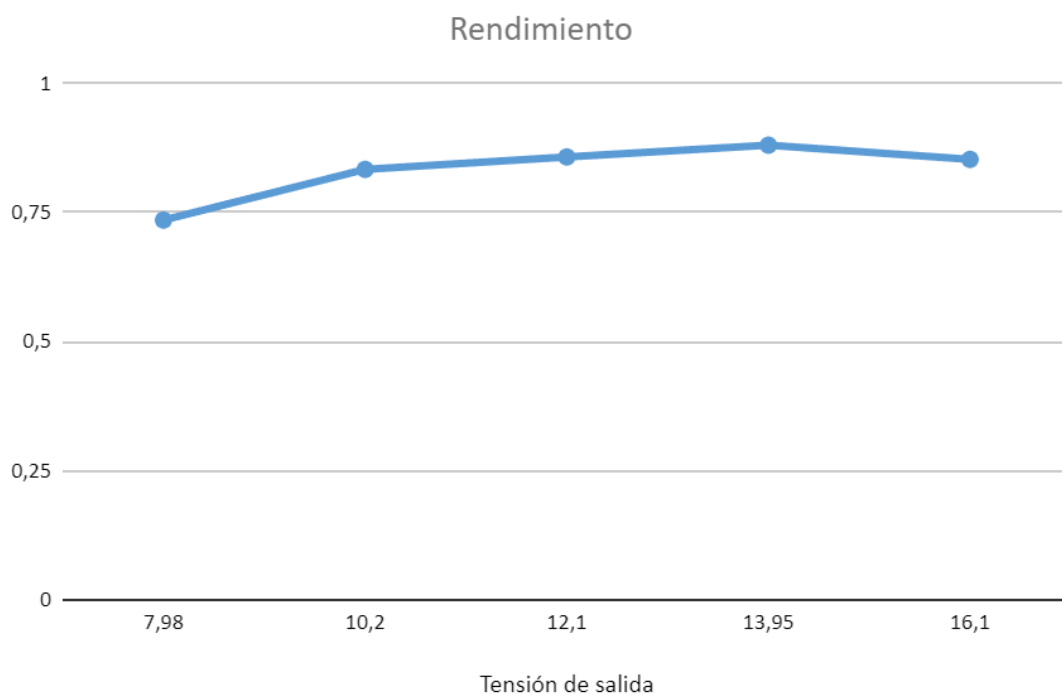


Figura: 111 Eficiencia respecto a la tensión de salida

10.3.- CONVERTIDOR BUCK CON MÓDULO XL4015

Este módulo (Figura 112) no ha sido posible obtener valores en prácticas, pero es bastante interesante tanto por su precio como por sus características que mencionaremos posteriormente. Como inconveniente destacamos la bobina sin

proteger que puede suponer un peligro para el alumnado ya que contamos con que no tienen experiencia en la manipulación de este tipo de placas. Podemos encontrar este módulo por un precio de aproximadamente 1.50 € por unidad, por lo que es un precio un poco más elevado que el modelo LM2596 pero que según el datasheet ofrece un mayor rendimiento.

El XL4015 es un convertidor (DC/DC) tipo reductor (Buck) de frecuencia fija de 180 kHz, capaz de manejar una carga de hasta 5 amperios con alta eficiencia, baja ondulación y excelente regulación de línea y carga. Requiere un mínimo de componentes externos, lo que lo hace fácil de usar, e incluye compensación de frecuencia interna y un oscilador de frecuencia fija. El circuito de control PWM puede ajustar linealmente la relación de ciclo de trabajo de 0 a 100%. También cuenta con protección contra sobrecorriente, y una protección contra cortocircuitos, donde la frecuencia de operación se reduciría de 180 kHz a 48 kHz. Además, tiene un bloque de compensación interno para minimizar la cantidad de componentes externos necesarios.

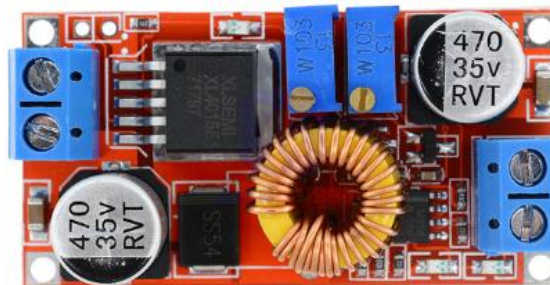


Figura: 112 Regulador XL4015

El XL4015 es un regulador de voltaje y corriente DC-DC ampliamente utilizado en aplicaciones electrónicas, especialmente en sistemas de suministro de energía y control de voltaje. Este módulo destaca por poder regular por separado el voltaje y/o amperaje con sus dos potenciómetros. A continuación, se proporciona una descripción detallada de sus características, las cuales están en mayor detalle en su datasheet.

Comenzaremos por sus características principales:

- Entrada y Salida de Voltaje de 4V a 38V y de 1.25V a 32V respectivamente.
- Corriente de Salida ajustable máxima a 5A.
- Ciclo de trabajo máximo del 100%
- Eficiencia máxima de 96%
- Frecuencia máxima de trabajo de 180KHz
- Protección contra cortocircuitos y de temperatura
- Encapsulado TO263-5L de 5 pines, con placa metálica para la disipación de calor.

- Dimensiones: 51,2 x 26,2 x 16,8mm

Seguiremos describiendo el encapsulado (Figura 113), el cual describimos sus pines a continuación:

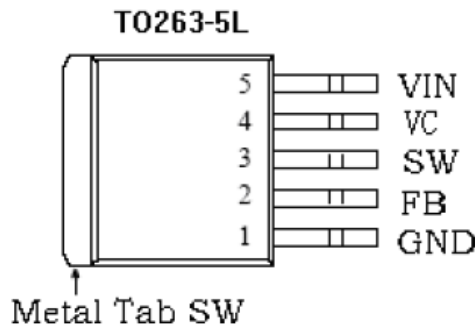


Figura: 113 Encapsulado y pin out del módulo XL4015

1. GND: Pin de tierra. Este pin debe colocarse fuera de la trayectoria de tierra desde el diodo Schottky hasta el capacitor de salida para evitar que los picos de corriente de conmutación induzcan ruido de voltaje en el XL4015.
2. FB: Pin de retroalimentación (FB). A través de una red de división de resistores externa, FB detecta el voltaje de salida y lo regula. El voltaje umbral de retroalimentación es de 1.25V.
3. SW: Pin de salida del interruptor de potencia (SW). SW es el nodo de interruptor que suministra energía a la salida.
4. VC: Capacidad de derivación del regulador de voltaje interno. En una aplicación de sistema típica, el pin VC se conecta a un capacitor de 1 μ F a VIN.
5. VIN: Pin de entrada de voltaje de alimentación. El XL4015 opera con un voltaje de CC de 8V a 36V. Derivar VIN a GND con un capacitor lo suficientemente grande para eliminar el ruido en la entrada.

Dentro del diagrama de bloques (Figura 114) distinguimos los siguientes pines de salida del regulador:

1. Pin de tierra. Debe tenerse cuidado en el diseño. Este pin debe ser colocado fuera de la ruta de tierra del diodo Schottky al condensador de salida para evitar que los picos de corriente de conmutación induzcan ruido de tensión en el XL4015.
2. Pin de realimentación (FB). A través de una red divisora de resistencias externa, FB detecta la tensión de salida y la regula. El umbral de tensión de realimentación de tensión umbral de realimentación es de 1,25V.

3. Pin de salida del interruptor de potencia (SW). SW es el nodo interruptor que suministra alimentación a la salida.
4. Capacidad de Bypass del Regulador de Voltaje Interno VC. En un sistema típico, el pin VC conecta una capacidad de 1uF a VIN.
5. Pin de entrada de tensión de alimentación. El XL4015 funciona con una tensión de 8V a 36V, se puede puentear Vin a GND con un condensador para eliminar el ruido en la entrada.

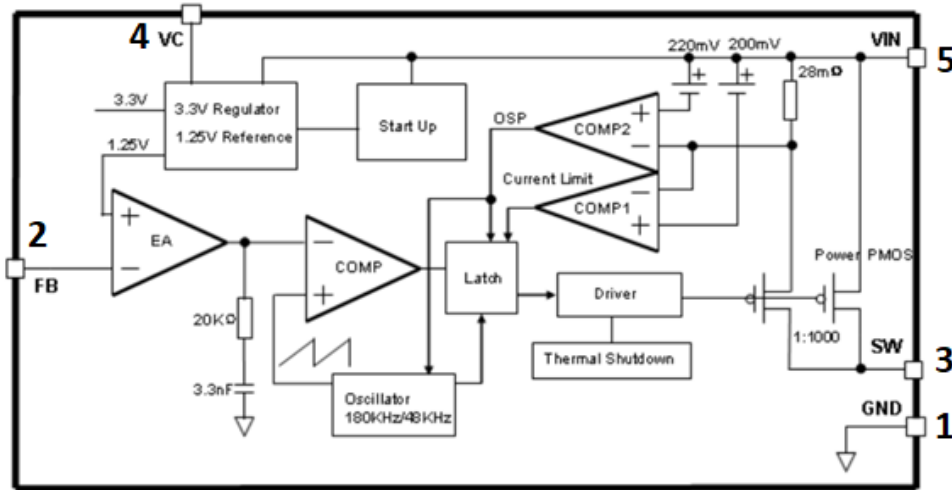


Figura: 114 Diagrama de bloques del módulo XL4015

Una vez visto el diagrama de bloques seguiremos con el circuito interno representado en la (Figura 115), y realizaremos una descripción de los componentes que la integran.

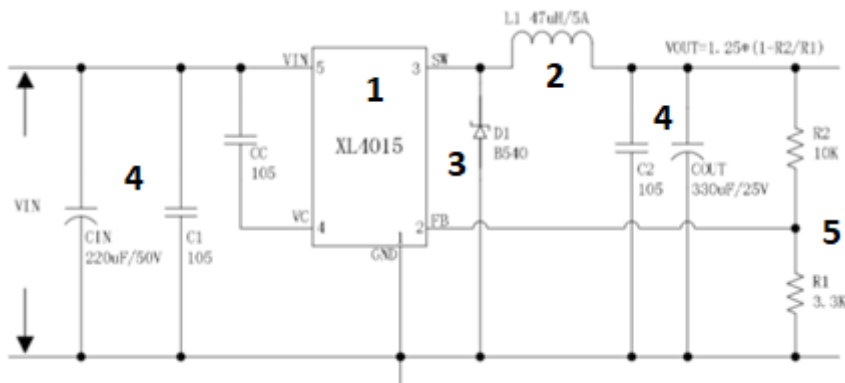


Figura: 115 Circuito interno del regulador XL4015

- **XL4015:** El propio regulador XL4015 es el componente principal. Es el chip que realiza la conversión de voltaje y corriente de entrada a la salida deseada.
- **Inductor:** Un inductor suele ser necesario para almacenar energía y filtrar la corriente. El valor y la capacidad de corriente del inductor dependen de la aplicación específica y de la corriente de salida requerida.

- **Diodo de Protección de Retroceso:** En una configuración típica, se utiliza un diodo Schottky de protección de retroceso en paralelo con el inductor para permitir que la corriente fluya en una sola dirección y evitar daños al circuito.
- **Condensadores de Entrada y Salida:** Se utilizan condensadores tanto en la entrada como en la salida del regulador para filtrar el ruido y estabilizar la tensión de entrada y salida. Los valores de capacitancia pueden variar según la aplicación.
- **Resistor de Retroalimentación (Feedback):** Un resistor de retroalimentación se utiliza para configurar la tensión de salida deseada. Su valor determina la relación de división de tensión en el circuito de retroalimentación.

Por último, en la Figura 116 podemos observar un ejemplo de la eficiencia del regulador para una tensión de entrada de entre 15V y 36V, una tensión de salida de 12V y una corriente de salida de entre 0,1A y 4A. La eficiencia varía en función de la corriente de salida y la tensión de entrada, como podemos observar esta alcanza su máximo a 1A aproximadamente y va disminuyendo lentamente conforme se eleva la corriente de salida, aun así, son valores realmente altos de eficiencia.

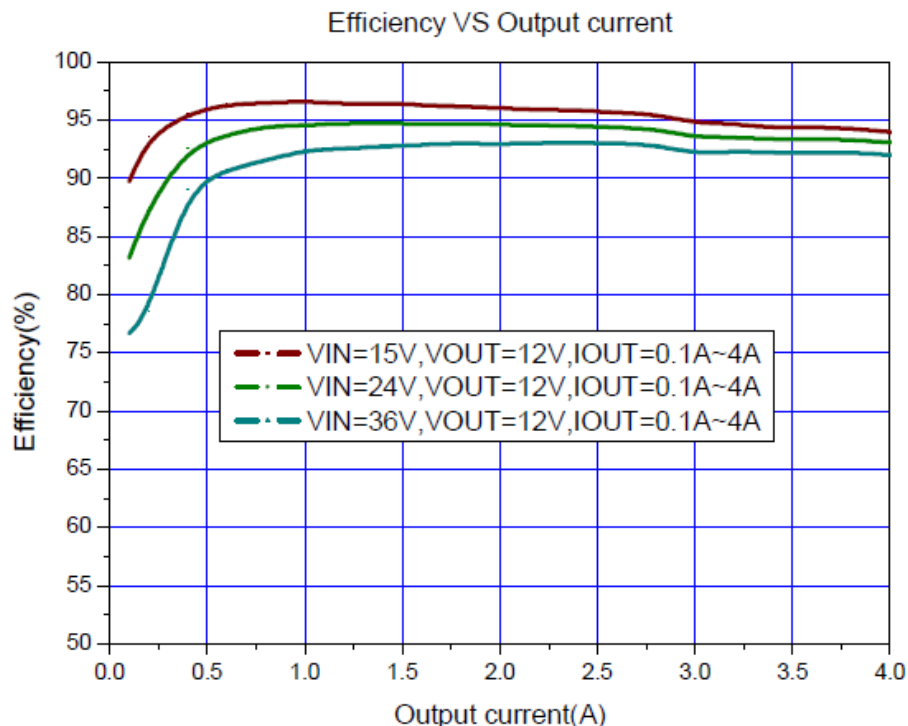


Figura: 116 Eficiencia a la salida para diferentes tensiones de salida en función de la corriente en el módulo XL4015

En resumen, el XL4015 es un regulador de voltaje y corriente DC-DC versátil y eficiente que se utiliza en una variedad de aplicaciones electrónicas para controlar el voltaje y la corriente de salida de manera efectiva y eficiente. Su capacidad de ajustar voltaje y corriente de salida, junto con su alta eficiencia, lo hace muy popular en proyectos de electrónica y suministro de energía. Este regulador es muy similar a los ya usados y con

un precio muy parecido pero que promete una mayor eficiencia por lo que resulta bastante interesante para un futuro.

10.4.- CONVERTIDOR BOOST CON MÓDULO MT3608

El módulo MT3608 (Figura 117) es un regulador de voltaje de conmutación DC-DC Boost ampliamente utilizado en proyectos electrónicos. Es conocido por su eficiencia y versatilidad en la regulación de voltajes. A continuación, se proporciona una descripción detallada de sus características, que hemos encontrado en su datasheet. Podemos encontrar este módulo por un precio de aproximadamente 1.05 € por unidad.

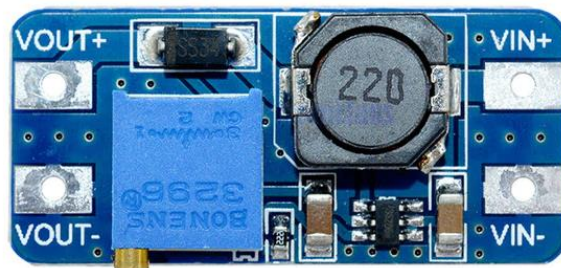


Figura: 117 Regulador MT3608

El MT3608 es un convertidor elevador de frecuencia constante, con 6 pines en el encapsulado SOT23, diseñado para aplicaciones pequeñas y de baja potencia. Opera a una frecuencia de conmutación de 1.2MHz y permite el uso de capacitores e inductores pequeños y económicos de 2 mm o menos de altura. Su arranque suave interno reduce la corriente de arranque y prolonga la vida útil de la batería.

El MT3608 cuenta con una característica que cambia automáticamente al modo de modulación de frecuencia de pulso en cargas ligeras. También incluye protección contra subvoltaje, limitación de corriente y protección contra sobrecarga térmica para evitar daños en caso de sobrecarga en la salida.

El MT3608 utiliza una arquitectura de regulador de impulso de modo de corriente pico de frecuencia fija para regular el voltaje en el pin de retroalimentación. Durante cada ciclo del oscilador, el MOSFET se enciende a través del circuito de control. Para evitar oscilaciones subarmónicas en ciclos de trabajo superiores al 50 por ciento, se agrega una rampa de estabilización a la salida del amplificador de corriente y el resultado se introduce en la entrada negativa del comparador PWM. Cuando este voltaje es igual al voltaje de salida del amplificador de error, se apaga el MOSFET de potencia. La salida del amplificador de error es una versión amplificada de la diferencia entre el voltaje de referencia de la banda de 0.6V y el voltaje de retroalimentación, manteniendo así el nivel de corriente pico para mantener la regulación de salida. Si el voltaje de retroalimentación comienza a disminuir, la salida del amplificador de error aumenta, lo que resulta en un aumento de la corriente a través del MOSFET de potencia y, por lo tanto, en la entrega de más potencia a la salida. El MT3608 tiene un arranque suave interno para limitar la cantidad de corriente de entrada al inicio y para limitar también la cantidad de sobretensión en la salida. En la Figura 118 se puede ver su diagrama de bloques que realiza el ciclo anteriormente descrito.

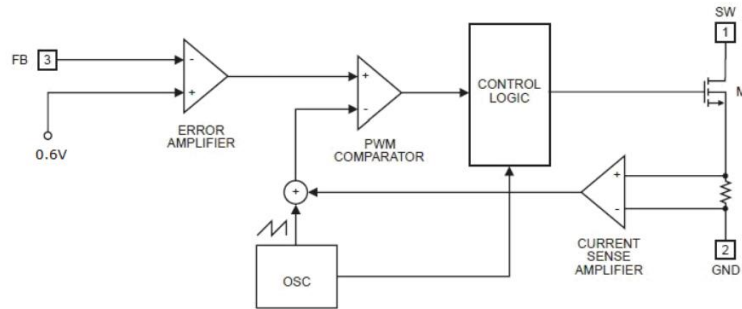


Figura: 118 Diagrama de bloques del módulo MT3608

El MT3608 es adecuado para una variedad de aplicaciones, incluyendo equipos alimentados por batería, decodificadores, suministro de voltaje para pantallas LCD, módems DSL y de cable, enrutadores, así como tarjetas de red que se alimentan desde ranuras PCI.

En cuanto a sus características destacamos:

- Entrada de Voltaje de 2V hasta 24V
- Integrado por un mosfet de potencia de 80mΩ
- Compensación interna
- Corriente de Salida máxima de 4A.
- Eficiencia de conversión máxima del 97 %.
- Dimensiones: 36mm*17mm*7mm.
- Tensión de salida V_{out} ajustable entre 2V y 28V
- Potencia de salida de 6W.

En cuanto a los componentes que podemos ver en la (Figura 119) tenemos:

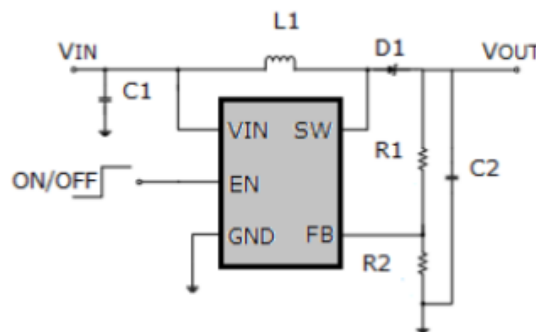


Figura: 119 Circuito interno del regulador MT3608

- Convertidor MT3608, en este caso en un encapsulado 6-pin SOT23-6.
- Condensadores de entrada y salida electrolíticos de 47/220 μ F y 50 V.
- Bobina con un valor de 33 μ H.
- Diodo rectificador Schottky. Este diodo puede aguantar una corriente máxima directa de 3 A y una tensión inversa repetitiva de 40 V.
- Un potenciómetro que hace las veces de carga de salida regulable.
- Resistencia de 1k Ω conectada al potenciómetro que ajustará la salida.

En su encapsulado, enumeraremos y describiremos los pines de salida del regulador (Figura 120)

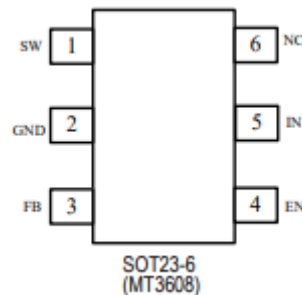


Figura: 120 Encapsulado y pin out del módulo MT3608

1. GND: Este es el pin de tierra.
2. SW: Este es el pin de interruptor (switch). Se conecta el inductor entre este pin y el pin de VIN. Este puede oscilar entre GND y 28V.
3. FB: Este es el pin de retroalimentación (feedback). Se utiliza para controlar la salida del regulador ajustando el voltaje de referencia. El voltaje de este pin es 0.6V.
4. EN: Este es el pin de habilitación (enable). Se utiliza para activar o desactivar el regulador.
5. VIN: Este es el pin de entrada de voltaje. Se conecta aquí la fuente de alimentación que suministra el voltaje que se va a elevar.

Dentro de su datasheet tambien podemos encontrar graficas que describen el comportamiento típico del regulador para unas tensiones de entrada y salida en función de la corriente de salida determinados.

En la Figura 121 podemos observar un ejemplo de la eficiencia del regulador para una tensión de entrada de 13V y una tensión de salida de 18V, esta varía en función de la corriente de salida, como podemos observar esta alcanza su máximo a 350mA aproximadamente y se establece constante hasta llegar a 700mA, donde ya empieza a disminuir la eficiencia poco a poco, aun así, son valores realmente altos de eficiencia.

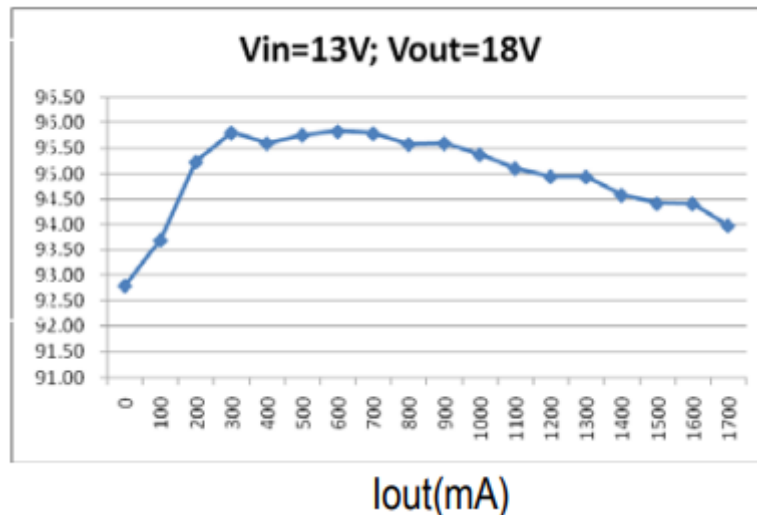


Figura: 121 Eficiencia del Regulador MT3608

En resumen, el módulo MT3608 es un regulador de voltaje y corriente DC-DC Boost versátil y eficiente que se utiliza en una variedad de aplicaciones electrónicas para controlar el voltaje y la corriente de salida de manera efectiva y eficiente. Su capacidad de ajustar voltaje y corriente de salida, junto con su alta eficiencia, lo hace muy popular en proyectos de electrónica y suministro de energía. Este regulador resulta muy interesante por su tamaño compacto y su eficiencia.

10.5.-RESUMEN Y CONCLUSIÓN DEL ANALISIS DE LOS MÓDULOS Y PRÁCTICAS

Una vez obtenidos los valores de los convertidores analizados, podemos realizar la comparativa con lo que se ha obtenido en el trabajo de Adrián polo [4].

Para los convertidores Buck que utilizan LM2596 en el anterior trabajo se obtuvieron valores de rendimiento que oscilan entre un 75% y un 80% y en este entre 72% y 78% para el mismo circuito, sin embargo, al analizarse las demás configuraciones con display y pulsadores oscila entre un 78% y 83% para una salida de tensión variable entre 6 y 8V. Con este último nos acercamos un poco más a la eficiencia de conversión máxima de 92% que promete el fabricante, aunque todavía nos quedamos muy lejos.

Para el convertidor XL6009 en el anterior trabajo para valores de salida comprendidos entre 8 y 10V se obtuvieron valores de rendimiento comprendidos entre 83% y 89%, en el caso de las nuevas medidas realizadas para una tensión de salida entre 10 y 16V se han obtenido unos valores de rendimiento comprendidos entre un 72% y un 87%. Estas

medidas experimentales siguen estando lejos del 94% de eficiencia que nos asegura el fabricante.

En cuanto a la posibilidad de incluir nuevos convertidores como el XL4015 y el MT3608 se ha llegado a la conclusión de que no hay una gran diferencia con los convertidores ya disponibles dentro de las prácticas, tanto por precio como por sus características como para incluirlos dentro de las prácticas.

En cuanto al análisis de las prácticas que se ha llevado con los alumnos, hemos encontrado algunas dificultades que se les presentan durante la realización de estas. La falta de preparación previa a las prácticas es un problema principal, ya que los alumnos no dedican el tiempo suficiente a revisar los guiones antes de asistir al laboratorio. Esto repercute negativamente en su comprensión de los conceptos tratados y en la gestión del tiempo durante la práctica, lo que a menudo resulta en que no logren completarla en su totalidad. Esta dificultad es especialmente notable en la primera práctica con convertidores LM2596, donde muchos alumnos, especialmente aquellos de especialidades distintas a la electrónica, necesitan más tiempo para familiarizarse con el material y los equipos del laboratorio. Esta primera experiencia con este tipo de prácticas requiere un periodo de adaptación más extenso para algunos estudiantes.

Por otro lado, en lo que respecta al convertidor Boost XL6009, la situación difiere notablemente. Aquí, la mayoría de los estudiantes logran completar la práctica debido a su experiencia previa en mediciones. Esta familiaridad con los procedimientos y equipos les permite desenvolverse con mayor fluidez en el laboratorio, optimizando así el tiempo asignado para la realización de la práctica. Es evidente que esta diferencia en los resultados entre ambas prácticas resalta la importancia de la preparación previa y la experiencia acumulada en el manejo de los equipos, demostrando cómo estas habilidades pueden influir significativamente en el desempeño de los alumnos durante las sesiones prácticas de laboratorio.

11.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.D. Aguilar-Pena, J.I. Fernández-Carrasco, D. Cintas-Cintas "Placas de convertidores DC-DC de bajo coste aplicadas a la docencia de Sistemas Electrónica." XIII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica. Tenerife 2018
En línea: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6828038>
- [2] J. D. Aguilar-Peña, C. Rus-Casas, L. Hontoria, J. I. Fernández-Carrasco and F. Baena, "Low-cost commercial circuit boards for internships with engineering students," 2022 Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (XV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference), Teruel, Spain, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE54169.2022.9840616.
- [3] Cintas Cintas (2017). Estudio técnico, experimentación y medida sobre convertidor boost dc-dc basado en placa de evaluación PMLKBOOSTVMB. Trabajo Fin de Grado.

Escuela Politécnica Superior. Universidad de Jaén. [En línea:
<https://hdl.handle.net/10953.1/7995>]

[4] Polo Campos (2020). Propuesta didáctica para impartir sistemas electrónicos de potencia con hardware y software de muy bajo coste. Escuela Politécnica Superior. Universidades de Jaén.

[5] R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Springer US, 2001, [online] Available: <https://doi.org/10.1007/b100747>.

[6] winder (2008), Power Supplies for LED Driving, Editorial Newnes.

[7] N. Mohan, *Courses and Laboratories Developed at the University of Minnesota*, [online] Available: <https://nedmohan.umn.edu/courses-and-laboratories-developed-university-minnesota>.

[8] M. H. Rashid, "Electrónica de potencia." Pearson Educación, México, D.F. T. L. Floyd, "Dispositivos electrónicos". 2008.

[9] Hart, W. Daniel. (2001). *Electrónica de Potencia*. Editorial Pearson

[10] Hart, W. Daniel. (2011). *Power Electronics*. Editorial McGraw-Hill