

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL  
Y AUTOMÁTICA **TRABAJO FIN DE GRADO**

***ESTUDIO TEÓRICO PRÁCTICO DE LOS  
CONVERTIDORES ELÉCTRICOS Y SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS***

**Alumno:** Domínguez Dionisio, Andoni

**Director:** Oleagordia Aguirre, Iñigo Javier

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** Julio – 2019

## Resumen

Cada vez son más notables las consecuencias producidas por el cambio climático, y la ciencia ha constatado el hecho de que los humanos son los principales causantes de ello. En este sentido, la emisión de gases de efecto invernadero especialmente dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, es la principal causa del aumento global en las temperaturas, donde el sector de la energía es responsable del 78% de los gases contaminantes enviados a la atmósfera en la Unión Europea [1]. Por esta razón, la investigación y desarrollo continuado de convertidores eléctricos más eficientes, y fuentes de energía menos contaminantes y por lo tanto más favorables para el medio ambiente debe ser uno de los principales compromisos del siglo XXI. Una de estas fuentes de energía y de la que trata este trabajo de fin de grado es la energía solar fotovoltaica y su conversión a otras formas de electricidad mediante convertidores eléctricos.

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado, es enseñar al lector los conocimientos necesarios para que pueda desarrollar un sistema completo de energía solar fotovoltaica por sí mismo, y cualquier otro conjunto de convertidores eléctricos.

Por ello, para comenzar, se estudiarán los conceptos acerca del funcionamiento de los paneles fotovoltaicos y el estudio de su punto de máxima potencia MPPT. Después se estudiarán a fondo los convertidores eléctricos, haciendo hincapié en el modelo matemático de los diferentes tipos y distribuciones, también se incluirán los transformadores ya que todos juntos forman la base para la transformación y el transporte de electricidad. Tras adquirir estos conocimientos, se propone un proceso completo de selección de todos los componentes que componen un sistema de generación eléctrica fotovoltaica.

Por último, se explicarán los diseños y montajes de varios convertidores eléctricos, entre ellos, un prototipo y maqueta a pequeña escala de un sistema solar fotovoltaico con todos los convertidores eléctricos necesarios para transformar los 12 V DC del panel solar en 230 V AC. La idea es que de estos 230 V AC, volver a transformar la energía de forma que sea variable para poder utilizarla en diferentes aplicaciones; por ello, se han desarrollado dos variantes, una fuente de alimentación DC de laboratorio que entrega hasta 30 V y 3.5 A variables, y un regulador de tensión alterna AC-AC que es capaz de regular hasta una potencia de 3.6 kW. De forma que así, de la energía obtenida de un panel solar, tras un proceso de transformación, se disponga de salidas AC y DC regulables.

**Palabras clave:** Energía fotovoltaica, convertidores eléctricos, transformación, regulación, generación eléctrica.

## Abstract

The consequences produced by climate change are becoming more noticeable each year, and science has confirmed the fact that humans are the main cause of this. Moreover, the emission of greenhouse gases, especially carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, is the main cause of the global increase in temperatures, where the energy sector is responsible for 78% of the polluting gases sent to the atmosphere in the European Union [1]. For this reason, the research and continuous development of more efficient electrical converters and sources of renewable energy that are less polluting and therefore more favorable for the environment, should be one of the main commitments of the 21st century. One of these sources of energy, and one that this end-of-degree project deals with, is photovoltaic solar energy and its conversion to other forms of electricity through electrical converters.

The main objective of this end-of-degree project is to give the reader the necessary knowledge so that he can develop a complete system of photovoltaic solar energy by himself, and any other set of electrical converters.

Therefore, this document will begin explaining the concepts about the operation of the photovoltaic panels and how to study their MPPT point. After this, electrical converters will be thoroughly studied, emphasizing the mathematical model of the different types and distributions, transformers will also be included, since all together form the basis for the transformation and transport of electricity. After acquiring this knowledge, a complete process of selection of all the equipment that composes a photovoltaic electric generation system is proposed.

Finally, the designs and assemblies of several electrical converters will be explained, among them, a prototype and small-scale model of a photovoltaic solar system with all the electrical converters that are necessary to transform the 12 V DC of the solar panel into 230 V AC. The idea is that from these 230 V AC, be able to transform the energy so that it is variable to use it in different applications. Therefore, two variants have been developed, an adjustable laboratory DC power supply that delivers up to 30 V and 3.5 A, and an AC-AC voltage regulator that is capable of regulating up to a power of 3.6 kW. In this way, from the energy obtained from a 12 V solar panel, after a transformation process, the outputs that are available are adjustable AC and DC outputs.

**Keywords:** Photovoltaic energy, electrical converters, transformation, regulation, electric generation.

## Laburpena

Gaur egun gero eta nabariagoa da klima aldaketa eta bere ondorioak, gainera zientziak egiaztatu du horren eragile nagusiak gizakiak direla. Alde horretatik, negutegi efektuko gasak dira temperaturen igoeren errudun nagusienetakoak eta horien artean aipagarriena karbono dioxidoa, CO<sub>2</sub>. Hain zuzen, Europar Batasunean energiaren sektorea da atmosferara isuritako gas kutsakorren %78-aren eragilea [1]. Hau kontuan izanik, bai eraginkortasun hobea duten bihurtailuen ikerkuntza eta garapena, zein energia iturri garbiagoen sustapena izan beharko litzateke XXI. Menderako konpromisu nagusienetako bat. Eguzki energia fotovoltaikoa da horietako bat eta hain zuzen lan honetan landu izan dena. Horrekin batera, lorturiko energiaren eraldaketa lortzeko erabili daitezkeen bihurtailu elektriko ezberdinak ere landu izan dira.

Lan honen helburu nagusia, eguzki energia fotovoltaikoko sistema bere osotasunean aztertzea eta azaltzea da. Gainera, edozein bihurtailu elektrikodun multzoak deskribatuz.

Gauzak horrela, lehenik panel fotovoltaikoen kontzeptu nagusiak eta hauen potentzia maximoko puntua (MPPT) aztertuko dira. Jarraian, bihurtailu elektrikoak sakonki azalduko dira, batez ere, modelo bakoitzaren eredu matematikoa eta distribuzioa nabarmenduz. Gainera, transformadoreak ere landuko dira, hauekin batera elektrizitate transformazio eta garraioaren oinarriak eratzten baitira. Hau guztia barneratuta, energia fotovoltaikodun sistema oso baten eraketa proposatzen da.

Bukatzeko, hainbat bihurtailu elektrikoaren diseinuak eta muntaiak azalduko dira, horien artean, eguzki-sistema fotovoltaiko baten prototipo eta eskala eredu bat, eguzki-paneleko 12 V DC 230 V AC-ra eraldatzeko beharrezko bihurtailu guztiekin. Lorturiko 230 V AC horiekin bi irteera garatu dira, lehen, laborategiko elikatze iturria, DC 30 V eta 3,5 A ematen dituen, eta bigarrena, AC-AC tentsio erregulatuak, 3,6 kW-ko potentzia arte erregulatzeko gai dena. Honela, AC eta DC irteera doigarriak lortzen dira, eguzki-panel batetik lortutako energia transformatuz.

**Hitz gakoak:** Energia fotovoltaikoa, bihurtailu elektrikoak, eraldaketa, erregulazioa, sorkuntza elektrikoak.

## ÍNDICE

1. Introducción .....	10
1.1. El problema medioambiental.....	10
1.1.1. Solución al problema medioambiental .....	10
1.2. El problema energético .....	11
1.2.1. Solución al problema energético .....	12
1.3. Propuesta del proyecto .....	13
2. Contexto .....	14
3. Objetivos y alcance del proyecto.....	15
4. Estado del arte.....	16
4.1. Conceptos de paneles fotovoltaicos.....	16
4.1.1. El efecto fotoeléctrico.....	16
4.1.2. Estudio del punto de máxima potencia.....	17
4.2. Conceptos de convertidores eléctricos .....	18
4.2.1. AC-DC.....	19
4.2.2. DC-DC.....	29
4.2.3. DC-AC.....	35
4.2.4. AC-AC.....	39
4.2.5. Transformadores .....	41
4.3. El sistema energético fotovoltaico.....	42
4.3.1. Introducción.....	42
4.3.2. Paneles fotovoltaicos .....	44
4.3.3. Reguladores de carga.....	46
4.3.4. Sistemas de almacenamiento de energía .....	48
4.3.5. Sistemas de Inversión y Distribución de energía.....	53
5. Análisis y resultados .....	55
5.1. Introducción.....	55
5.2. Análisis de riesgos .....	55
5.3. Paneles solares y tensión del sistema .....	56
5.4. Diseño y montaje del Elevador de Tensión.....	57
5.4.1. Elevador de tensión con PWM basado en el Timer 555.....	57
5.4.2. Elevador de tensión basado en LM2577 (o similar).....	57
5.4.3. Elevador de tensión basado en PWM con Arduino:.....	58
5.5. Diseño y montaje del Inversor.....	61

---

5.6. Maqueta del sistema de convertidores 12 V DC - 230 V AC.....	70
5.7. Diseño y montaje del Regulador AC.....	71
5.8. Diseño y montaje de la Fuente de Alimentación de Laboratorio .....	75
5.9. Hardware Arduino .....	80
5.10. Software Arduino .....	82
6. Metodología .....	94
6.1. Descripción de tareas y fases del proyecto.....	94
6.2. Diagrama de Gantt.....	96
7. Aspectos económicos .....	97
7.1. Desglose de gastos.....	97
8. Conclusiones .....	99
9. Bibliografía.....	100
10. Anexos.....	102

## Índice de figuras

Fig. 1.1.1. Emisiones de gases de efecto invernadero en la UE por sector* en 2015.....	10
Fig. 1.2.1. Procedencia de las fuentes de energía en España [4] .....	11
Fig. 1.2.2. Inversiones en Energía Renovable a nivel mundial [7] .....	12
Fig. 1.2.3. Inversiones en Energía Renovable en España [7] .....	13
Fig.1.3.1. Evolución histórica de la generación eléctrica en España [8].....	14
Fig. 4.1.1. El efecto fotoeléctrico .....	16
Fig. 4.1.2. Curva I-V y P-V características de una celda fotovoltaica.....	17
Fig. 4.1.3. Punto de máxima potencia en diferentes condiciones.....	17
Fig. 4.2.1. Perdidas en el cable por el efecto joule respecto del aumento en la corriente [12].....	19
Fig. 4.2.2. Concepto media onda (izquierda) y onda completa (derecho) .....	20
Fig. 4.2.3. Rectificador media onda .....	20
Fig. 4.2.4. Forma de onda de la tensión en la carga respecto de la entrada.....	20
Fig. 4.2.5. Rectificador de onda completa (derecha) y puente de graetz (izquierda).....	21
Fig. 4.2.6. Forma de onda en la carga respecto de la entrada .....	21
Fig. 4.2.7. Filtrado de onda para rectificadores .....	22
Fig. 4.2.8. Rectificador trifásico P3 .....	23
Fig. 4.2.9. Formas de onda P3.....	23
Fig. 4.2.10. Rectificador trifásico PD3 no controlado.....	24
Fig. 4.2.11. Forma de onda PD3 No controlado.....	24
Fig. 4.2.12. Círculo de potencia.....	25
Fig. 4.2.13. Rectificador trifásico PD3 totalmente controlado .....	26
Fig. 4.2.14. Rectificador trifásico PD3 semicontrolado.....	27
Fig. 4.2.15. Círculo de potencias para rectificadores semicontrolados.....	28
Fig. 4.2.16. PWM modulación por ancho de pulso .....	29
Fig. 4.2.17. Formas de onda generales DC-DC.....	29
Fig. 4.2.18. Concepto regimen de conducción continua .....	30
Fig. 4.2.19. Reductor de tensión "buck" .....	31
Fig. 4.2.20. Variación de la corriente por la bobina.....	32
Fig. 4.2.21. Esquema del elevador de tensión.....	33
Fig. 4.2.22. Esquema del elevador reductor de tensión .....	34
Fig. 4.2.23. Tensión en la carga del inversor.....	35
Fig. 4.2.24. Esquema inversor monofásico .....	36
Fig. 4.2.25. Formas de onda .....	36
Fig. 4.2.26. Inversor monofásico con modulación PWM .....	37
Fig. 4.2.27. Esquema inversor trifásico con IGBTs .....	37
Fig. 4.2.28. Formas de onda inversor trifásico con modulación PWM .....	38
Fig. 4.2.29. Formas de onda inversor trifásico con modulación Six-Step .....	38
Fig. 4.2.30. Triac con tirisotres (izquierda) y funcionamiento del triac (derecha).....	39
Fig. 4.2.31. Formas de onda ideales de los reguladores de tensión .....	39
Fig. 4.2.32. Circuito esquemático de un cicloconvertidor .....	40
Fig. 4.2.33. Formas de onda del recorte producido por un cicloconvertidor.....	41
Fig. 4.2.34. Esquema de un transformador.....	41
Fig. 4.3.1. Sistema solar para autoconsumo con acumulador monoblock.....	42
Fig. 4.3.2. Distribución por bloques del montaje de la maqueta .....	43
Fig. 4.3.3. Sistema de generación solar bidireccional.....	43
Fig. 4.3.4. Panel solar monocristalino (izquierda) panel solar policristalino (derecha).....	44
Fig. 4.3.5. Panel solar térmico.....	45
Fig. 4.3.6. Paneles solares híbridos .....	46
Fig. 4.3.7. Esquema de un regulador de carga .....	47
Fig. 4.3.8. Regulador de carga PWM.....	47
Fig. 4.3.9. Regulador de carga MPPT .....	48
Fig. 4.3.10. Curvas de descarga de distintas tecnologías de baterías .....	49
Fig. 4.3.11. Curva de descarga de baterías de tecnología de Plomo Ácido.....	49

Fig. 4.3.12. Curvas de descarga de baterías de tecnología Li-Ion .....	50
Fig. 4.3.13. Curva de descarga Li-Ion vs Plomo Ácido .....	50
Fig. 4.3.14. Acumulador Monoblock.....	51
Fig. 4.3.15. Acumuladores estacionarios.....	52
Fig. 4.3.16. Inversor trifásico PWM.....	53
Fig. 4.3.17. Inversor monofásico con modulación PWM .....	54
Fig. 5.1.1. Diagrama de bloques de la conexión entre los prototipos de convertidores .....	55
Fig. 5.3.1. Panel solar empleado en la maqueta .....	56
Fig. 5.4.1. Elevador de tensión controlado por timer 555 .....	57
Fig. 5.4.2. Elevador de tensión con feedback controlado por LM2577 .....	58
Fig. 5.4.3. Elevador de tensión con PWM en Arduino .....	58
Fig. 5.4.4. Elevador de tensión en funcionamiento en protoboard .....	60
Fig. 5.4.5. Elevador de tensión en funcionamiento en maqueta alimentado por el panel solar.....	60
Fig. 5.4.6. Corriente medida con el multímetro con el elevador de tensión en funcionamiento .....	61
Fig. 5.5.1. Circuito esquemático del inversor.....	61
Fig. 5.5.2. Forma de onda en la base de los transistores.....	62
Fig. 5.5.3. Diseño típico de un multivibrador astable.....	62
Fig. 5.5.4. Cicuto multivibrador astable del inversor .....	63
Fig. 5.5.5. Pruebas del Inversor en el laboratorio con el osciloscopio.....	64
Fig. 5.5.6. Esquema transformador con toma intermedia.....	64
Fig. 5.5.7. Forma de onda ideal.....	64
Fig. 5.5.8. Forma de onda real obtenida con el osciloscopio .....	65
Fig. 5.5.9. Zoom Pre-Rutado.....	65
Fig. 5.5.10. Márgenes del Pre-Rutado .....	66
Fig. 5.5.11. Componentes colocados para el Rutado.....	66
Fig. 5.5.12. Inversor Rutado .....	67
Fig. 5.5.13. Circuito impreso en papel fotográfico a laser y placa de cobre.....	67
Fig. 5.5.14. Disolviendo cobre con ácido.....	68
Fig. 5.5.15. Eliminando la tinta restante sobre las pistas de cobre y pulido (derecha).....	68
Fig. 5.5.16. Componentes montados (izquierda) y circuito de potencia reforzado con estaño (derecha).....	69
Fig. 5.5.17. Interconexión de dos transformadores para obtener toma intermedia.....	69
Fig. 5.6.1. Maqueta del sistema de convertidores solar a tensión alterna domestica.....	70
Fig. 5.6.2. Maqueta en funcionamiento con el programa de control del Boost .....	70
Fig. 5.7.1. Regulador de tensión alterna.....	71
Fig. 5.7.2. Circuito esquemático del regulador de tensión alterna.....	71
Fig. 5.7.3. Funcionamiento del Triac.....	72
Fig. 5.7.4. Circuito de potencia del regulador AC resaltado en rojo.....	73
Fig. 5.7.5. $D=75\%$ , $D=50\%$ , $D=25\%$ - Siendo $D=Duty-Cycle$ .....	74
Fig. 5.7.6. Regulador AC en funcionamiento, regulando el filamento de una bombilla de 100W.....	74
Fig. 5.8.1. Circuito esquemático del rectificador incluido R1 (circuito descarga condensador) .....	75
Fig. 5.8.2. Circuito esquemático del rectificador.....	76
Fig. 5.8.3. Onda senoidal rectificada (izquierda) y filtrada (derecha) .....	76
Fig. 5.8.4. Circuitos reguladores de tensión con LM317.....	77
Fig. 5.8.5. Transistores en paralelo para aumentar la capacidad de entrega de corriente.....	77
Fig. 5.8.6. Circuito esquemático del amplificador.....	78
Fig. 5.8.7. Circuito esquemático completo de la fuente de alimentación de la boratorio 30V 3,5A.....	79
Fig. 5.8.8. Testeo del funcionamiento del circuito en la protoboard .....	79
Fig. 5.8.9. Zoom de la protoboard .....	80
Fig. 5.8.10. Fuente de alimentación de laboratorio finalizada .....	80
Fig. 5.9.1. Conexiones de Arduino .....	81
Fig. 5.9.2. Sensor Tensión Arduino FZ0430 .....	81
Fig. 5.9.3. Sensor corriente Arduino ACS712.....	82
Fig. 5.10.1. Código para la conmutación del Boost.....	83
Fig. 5.10.2. Salida por pantalla del programa del control del PWM.....	83
Fig. 5.10.3. Setup código Arduino.....	85
Fig. 5.10.4. Bucle "loop" para las mediciones con Arduino .....	86

*Fig. 5.10.5. Funciones para imprimir las variables por pantalla* ..... 86  
*Fig. 5.10.6. Resultados obtenidos por pantalla*..... 92  
*Fig. 5.10.7. Test del funcionamiento en el laboratorio con las fuentes de alimentación* ..... 93  
*Fig. 5.10.8. Resultados de la iluminación correcta del porcentaje de carga mediante LEDs* ..... 93  
*Fig. 8.1.1. Diagrama de bloques del sistema de convertidores completo que se ha desarrollado*..... 99

## Índice de tablas

*Tabla 1. Horas internas*..... 97  
*Tabla 2. Amortizaciones*..... 97  
*Tabla 3. Gastos*..... 98  
*Tabla 4. Resumen del desglose de gastos*..... 98

## Índice de datasheets (Anexos)

*Datasheet 1. Diodo Schottky para el elevador de tensión* ..... 102  
*Datasheet 2. Mosfet del elevador de tensión* ..... 103  
*Datasheet 3. Transistores del inversor* ..... 105  
*Datasheet 4. Triac del regulador de tensión alterna*..... 106  
*Datasheet 5. Regulador de tensión de la fuente de alimentación del laboratorio*..... 107  
*Datasheet 6. Transistor de potencia de la fuente de alimentación*..... 108

## Nomenclatura

$Q_c$  = Calor [Cal]

$P_c$  = Potencia en la carga [W]

$V_o$  = Tensión de salida [V]

$D$  = Duty cycle [adimensional]

$f$  = Frecuencia de conmutación del transistor [Hz]

$L_{min}$  = Inductancia mínima que asegura funcionamiento en modo continuo [Henrios]

$V_c$  = tensión media en la carga [V]

$I_c$  = corriente media en la carga [A]

$V_p$  = tensión en el primario [V]

$V_s$  = tensión en el secundario [V]

$R_t$  = relación de transformación [adimensional]

$r$  = rizado de la tensión de salida [adimensional generalmente se define en %]

$V_d$  = tensión media en los diodos [V]

$w$  = ángulo en grados de la onda senoidal [º grados]

$N_s$  = Número celdas en serie [adimensional]

$N_p$  = Número de celdas en paralelo [adimensional]

$H_f$  = energía de un foton absorbido [eV electronvoltios]

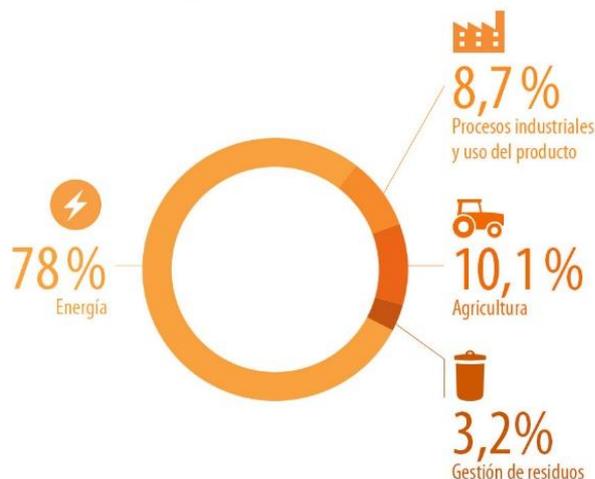
$H_{f0}$  = energía necesaria para liberar 1 electrón [eV electronvoltios]

$V_r$  = Tensión de rizado [V]

## 1. Introducción

### 1.1. El problema medioambiental

El sector de la energía es el principal sector contaminante en la unión europea [1], ya sea por emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la quema de minerales de poco poder calorífico como el lignito o residuos tóxicos de todo tipo, en particular los residuos nucleares. Sin mencionar las posibles consecuencias contaminantes que conllevaría un desastre nuclear.



\*Todos los sectores excluyendo el uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), Eurostat

Fig. 1.1.1. Emisiones de gases de efecto invernadero en la UE por sector\* en 2015

De cara a los problemas medioambientales causados por la producción energética, se pueden mencionar los más graves y lamentablemente, más habituales [2,3]:

- Asociados al cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero.
- Asociados a la contaminación.
- Degradación del suelo, debida a prácticas con poca responsabilidad ambiental.
- Asociados a la generación y/o eliminación de residuos.

#### 1.1.1. Solución al problema medioambiental

La solución a las consecuencias contaminantes asociadas a la generación de energía se puede solucionar mediante la integración de otros tipos de energías menos contaminantes y de menor impacto ambiental a los actuales, generalmente conocidas como energías renovables que se explicarán en el siguiente punto.

Lo cierto es, que la solución al problema medioambiental, no es nada fácil, ya que, para lograrlo, la concienciación de la población es completamente esencial, de forma que se logre trabajar en equipo y que la mayoría esté de acuerdo en que hay que ser responsable con el medioambiente, ayudando en lo que cada uno pueda, reciclando, utilizando menos energía, utilizando transporte público...

## 1.2. El problema energético

Es un hecho que actualmente se necesita energía para poder mantener las metrópolis funcionando. Esa necesidad de generar electricidad de cualquier forma conlleva un impacto medioambiental catastrófico a nivel mundial, es por este motivo que se debe conseguir energía de una manera sostenible para un futuro respetuoso con el medioambiente.

Tras tantos años generando energía de cualquier forma, el planeta se encuentra actualmente en esta situación de insostenibilidad energética y de un alto componente contaminante. Aunque cabe destacar, que poco a poco el origen de la electricidad está cambiando a mejor, como se puede ver en la fig 1.2.1, que define la procedencia en porcentaje de las diferentes fuentes de energía en España [4].

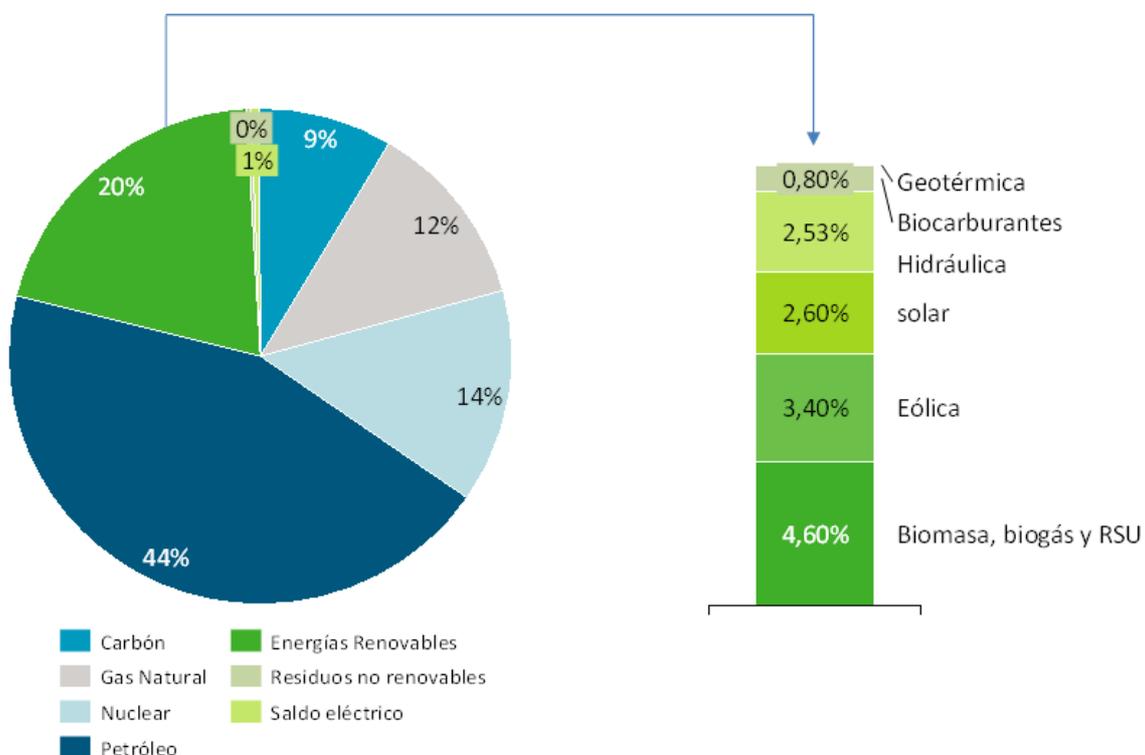


Fig. 1.2.1. Procedencia de las fuentes de energía en España [4]

Estas son las fuentes de generación de energía más habituales [5]:

- **Centrales térmicas convencionales:** debido a la quema de los combustibles fósiles se produce el efecto invernadero global y la lluvia ácida.
- **Energía nuclear:** las centrales nucleares tienen el problema que producen residuos radioactivos altamente contaminantes de difícil y costoso tratamiento.
- **Ciclos combinados:** al ser alimentados con gas natural, el mayor impacto ambiental es la combustión, explotación de los yacimientos, contaminación de aguas y suelos.
- **Energía biomasa:** además del impacto medioambiental de combustión y contaminación atmosférica, hay que sumarle una pérdida de vegetación, destrucción de biodiversidad, erosión del suelo, disminución de retención de agua, etc...

- **Energía eólica:** la instalación de grandes parques eólicos tiene un impacto medioambiental que recae directamente en la fauna local y el empobrecimiento del suelo.
- **Energía hidráulica:** los dos principales problemas de la construcción de embalses y presas son la fragmentación y pérdida de hábitats, y la perturbación a la flora y fauna.

### 1.2.1. Solución al problema energético

La principal solución es el empleo de alternativas de producción energética menos contaminantes [6]:

- **Energía solar:** procedente del efecto fotoeléctrico producido por el Sol.
- **Energía eólica:** proveniente del viento.
- **Energía hidráulica o hidroeléctrica:** proveniente de las corrientes de agua o saltos artificiales.
- **Energía geotérmica:** surgida del aprovechamiento del calor interno y natural de la Tierra.
- **Energía mareomotriz:** procedente del movimiento del mar al subir y bajar la marea.
- **Pilas de hidrogeno,** procedente del flujo continuo de combustible y oxidante donde mediante una reacción química controlada, da lugar a electricidad.
- **Energía azul u osmótica,** procedente del agua pero en este caso es obtenida de la diferencia en la concentración de la sal entre el agua de mar y el agua de río.

Aunque al principio la instalación requiera de una gran inversión, a largo plazo todo son ventajas.

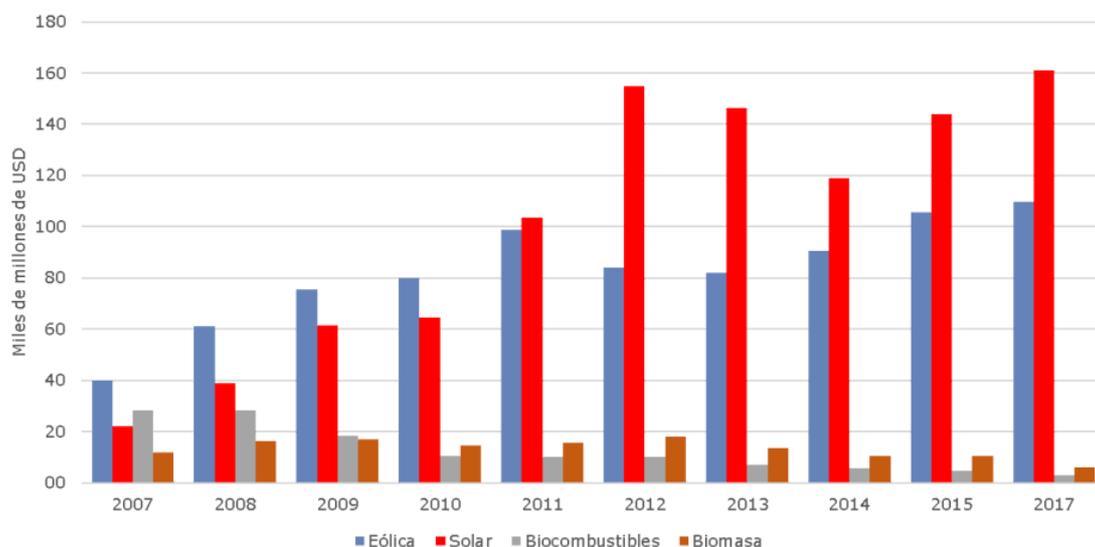


Fig. 1.2.2. Inversiones en Energía Renovable a nivel mundial [7]

En primer lugar, porque se trata de energía renovable y por tanto respetuosa con el medioambiente y, en segundo lugar, porque el ahorro económico es real, a lo largo de los años se amortiza la inversión inicial por completo y disminuye el precio final en los recibos de la luz.

Lo cierto es que España está apostando por las energías renovables, como se puede ver en la fig 1.2.3, y las inversiones son superiores y tienen mayor tendencia al alza si se comparan con las inversiones a nivel mundial, fig. 1.2.2.

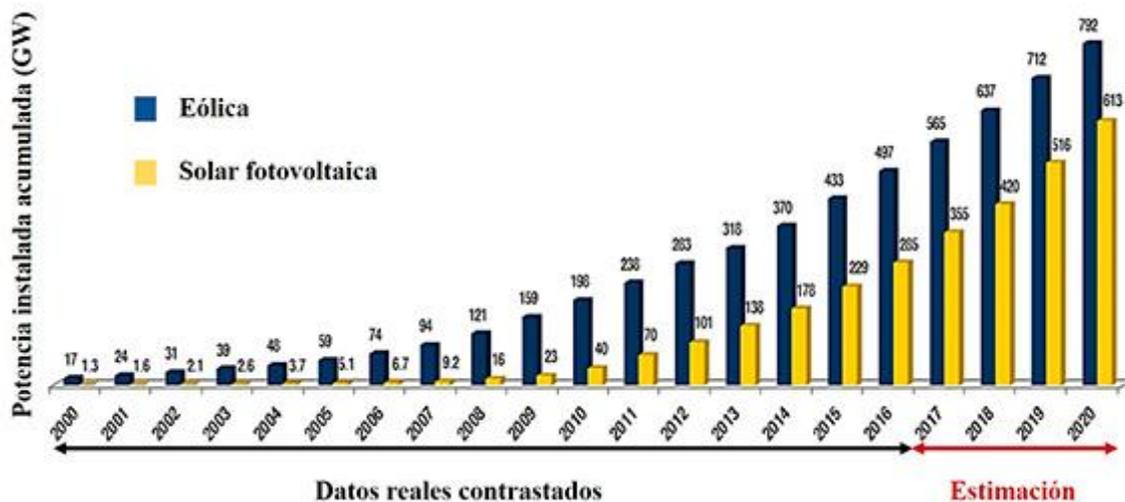


Fig. 1.2.3. Inversiones en Energía Renovable en España [7]

### 1.3. Propuesta del proyecto

Tras mencionar los problemas actuales a nivel global, y proponer algunas de las soluciones más favorables para solventar dichos problemas, se ha llegado a la conclusión en la que desarrollar un proyecto del área de la ingeniería eléctrica y electrónica relacionado con dichas soluciones, en concreto, paneles fotovoltaicos y convertidores eléctricos.

Como se mencionará en los siguientes apartados “Contexto” y “Objetivos y alcance del proyecto”, el proyecto trata de comprender el funcionamiento, diseño y construcción de los convertidores eléctricos, con los que ser capaz de diseñar un sistema de convertidores eléctricos para la generación de energía eléctrica empleando como fuente la energía solar.

Además, se mostrarán varios prototipos funcionales de convertidores eléctricos relacionados entre sí, y una maqueta de un sistema de generación solar mediante convertidores eléctricos, que se explicarán más adelante.

## 2. Contexto

La humanidad, vive en un mundo en el que no para de escuchar acerca del cambio climático, la contaminación, la deforestación, el aumento de la demanda energética, la escasez de agua, la extinción de especies, los excesos de residuos, etc.

Todos estos problemas han de tratarse uno a uno y deben ser entre otros muchos, los principales desafíos y objetivos del siglo XXI.

Algunos de ellos, pueden resolverse mediante la **integración generalizada de energías renovables y su descentralización**.

En la siguiente imagen se puede ver como ha sido la evolución histórica de la generación eléctrica en España, se trata de un gráfico de barras acumuladas, donde el area bajo al curva representa la cantidad en TWh que se produce en un determinado momento en el tiempo.

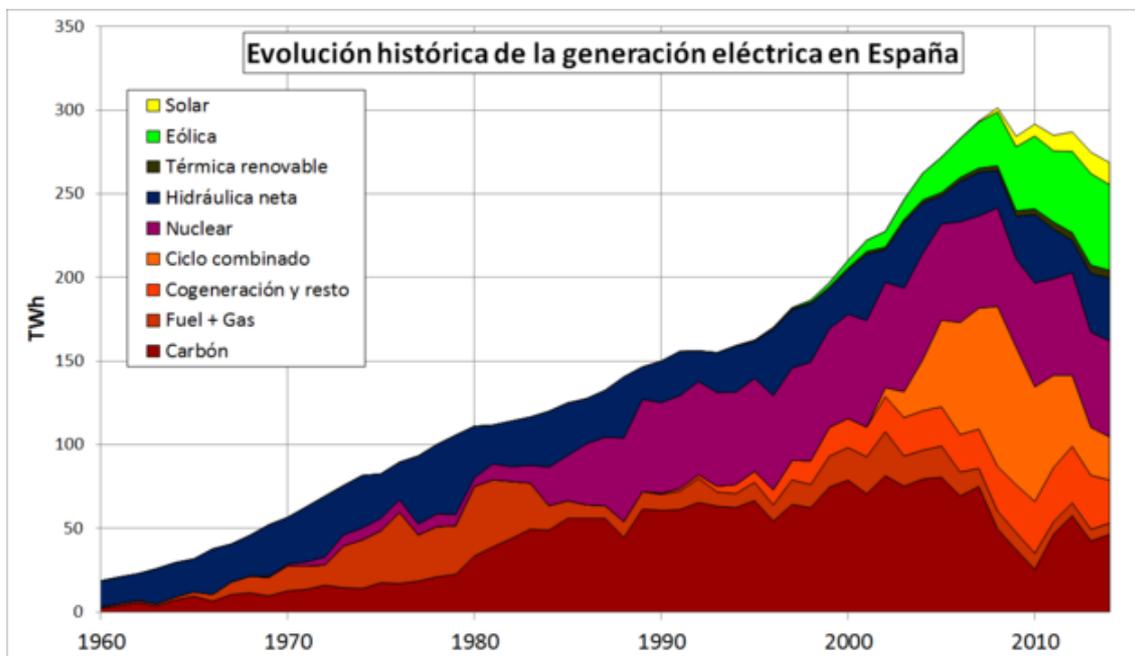


Fig..1.3.1. Evolución histórica de la generación eléctrica en España [8]

Debido a esto y en referencia a los dos puntos anteriores, tanto el problema medioambiental como el problema energético, veo necesaria una comprensión y cultura generalizada acerca del significado del término “energías renovables”, y no solo el término sino conocer los tipos, como entenderlo, seleccionarlo e implementarlo, tanto de forma particular como industrial.

Por lo que, en este trabajo de fin de grado, se va a conocer el funcionamiento, aplicación, selección de componentes y todo tipo de conocimientos técnicos, tanto prácticos como teóricos acerca de los diferentes convertidores eléctricos para la integración de un sistema de energía limpia y distribuida en particular; El sistema energético fotovoltaico.

### 3. Objetivos y alcance del proyecto

#### Objetivos

En referencia al contexto, el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es lograr que el lector comprenda cómo funcionan los sistemas de convertidores eléctricos asociados a un sistema completo de energía limpia y sostenible basado en paneles fotovoltaicos.

Cómo calcular y dimensionar correctamente todos los componentes y herramientas necesarias para la implementación.

Como seleccionar todos los componentes necesarios para el montaje de un sistema completo de convertidores eléctricos.

Y por último la explicación y el proceso de montaje de una maqueta a pequeña escala de un sistema convertidor de energía basado en paneles fotovoltaicos completo.

#### Alcance del proyecto

Se darán por sabidos muchos conceptos eléctricos o se explicarán de forma muy breve si así lo requieren, en su lugar también se asignarán referencias a las fuentes de las que provenga la información referente al tema que se está tratando.

Se trata de un documento en el que predominará el lenguaje técnico ya que es un documento orientado a lectores del entorno de las ingenierías.

En primer lugar, se tratarán los problemas principales asociados a la producción energética hoy en día, haciendo hincapié en los dos principales problemas, el problema medioambiental y el problema energético y proponiendo algunas soluciones.

En segundo lugar, se explicará un sistema generador de energía solar y todos sus convertidores eléctricos. Como calcularlos y como seleccionarlos.

Por último, se explicará todo lo anterior sobre un sistema completo de generación solar y convertidores eléctricos montado en miniatura. En el que se podrán ver casi todos los tipos de convertidores eléctricos que se mencionan en el proyecto:

- Elevador de tensión “boost” basado en PWM con Arduino
- Inversor Monofásico 12 V DC a 230 V AC
- Regulador Tensión Alterna de 3.6 kW
- Fuente de alimentación de laboratorio 30 V / 3.5 A

De esta forma se tratará de un proyecto muy completo, en el cual se recorrerá paso a paso por una ruta en la que se verán detalladamente, se aprenderán a calcular y a seleccionar uno por uno todos los componentes que componen un sistema completo de generación de energía solar.

## 4. Estado del arte

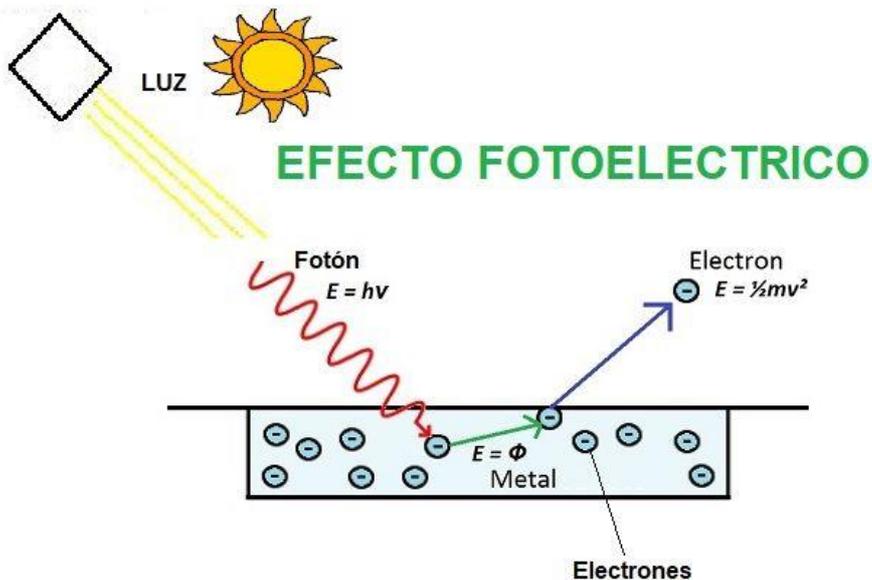
En este apartado, se van a conocer, en primer lugar los conceptos necesarios para la comprensión del funcionamiento de un panel solar fotovoltaico y su cálculo del punto de máxima potencia, después se van a tratar de forma matemática todos los convertidores eléctricos y transformadores, y por último, se van a explicar los distintos sistemas que se pueden emplear para obtener energía del sol, y como seleccionar correctamente todos los convertidores para desarrollar una instalación al completo.

### 4.1. Conceptos de paneles fotovoltaicos

#### 4.1.1. El efecto fotoeléctrico

Para transformar la energía solar en energía eléctrica, se necesita una célula fotoeléctrica. Estas células son unos dispositivos electrónicos que permiten transformar la energía luminosa en energía eléctrica mediante un proceso llamado “efecto fotoeléctrico” [9].

Este efecto fotoeléctrico produce un flujo de electrones cuando la célula fotoeléctrica es impactada por fotones. Cuando los fotones impactan, liberan los electrones, que con esa energía son capaces de cruzar la barrera de potencial de la unión P-N, como se puede ver en la siguiente imagen.



**Efecto Fotoeléctrico** = Emisión de los electrones de un metal cuando incide sobre el metal una luz

*Fig. 4.1.1. El efecto fotoeléctrico*

Donde las ecuaciones matemáticas para el cálculo del efecto fotoeléctrico son [9]:

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [1]$$

$$E = hf \rightarrow hf = \Phi + E_k \quad [2]$$

Donde  $h$  es la constante de plank,  $f_0$  es la frecuencia mínima en Hz para que pueda tener lugar el efecto fotoeléctrico,  $\Phi$  es la mínima energía necesaria para que un electrón escape del metal, y  $E_k$  es la máxima energía cinética de un electrón emitido en Js.

#### 4.1.2. Estudio del punto de máxima potencia

El aprovechamiento de la energía en paneles solares es bastante complejo ya que además de que el sol no ilumina de forma constante y perpendicular durante todo el día, los paneles solares actúan como fuentes de corriente en lugar de como fuentes de tensión, como si lo hace, por ejemplo, una batería. [10]

Debido a esto, es muy importante el estudio del punto de máxima potencia, para poder así aprovechar el máximo de energía posible.

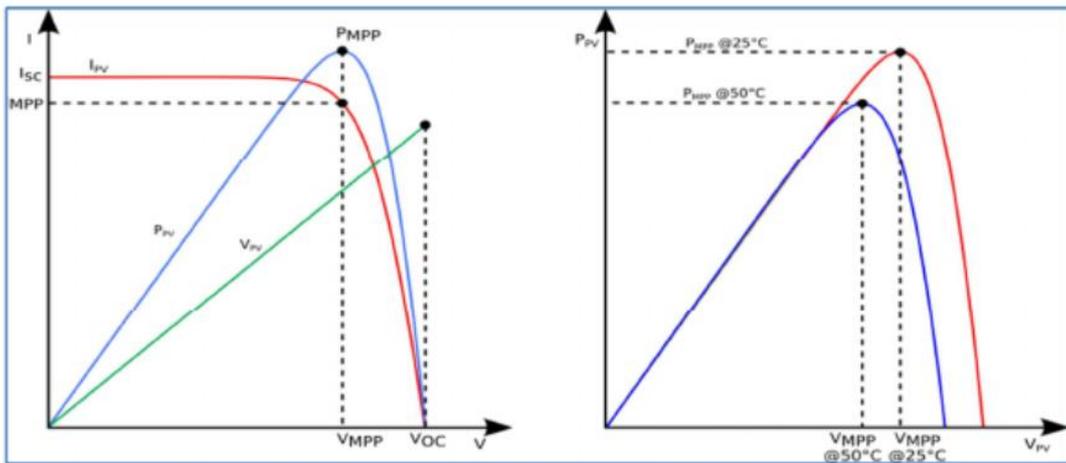


Fig. 4.1.2. Curva I-V y P-V características de una celda fotovoltaica

Siendo la ecuación siguiente, la base que describe el comportamiento de una celda solar.

$$I = I_{PH} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{nk \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad [3]$$

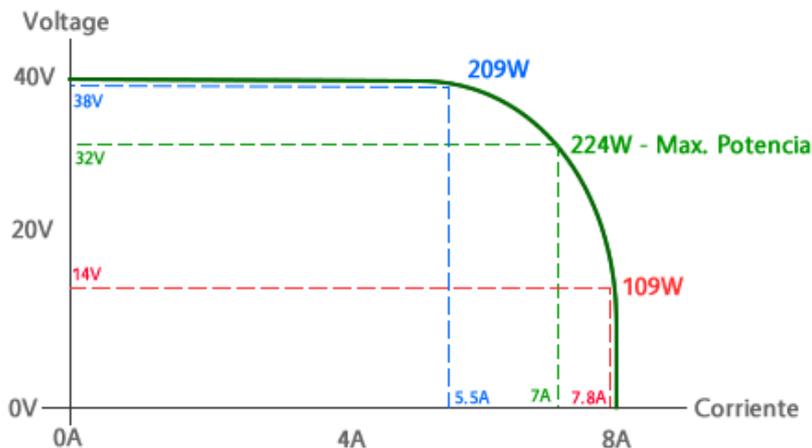


Fig. 4.1.3. Punto de máxima potencia en diferentes condiciones

Siendo la siguiente ecuación la que representa la corriente de un módulo fotovoltaico.

$$I = Np \cdot \left( I_{PH} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{nk \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + \frac{R_s \cdot I}{Np}}{Rp} \right) \quad [4]$$

Donde, “Ns” es Número de celdas serie y “Np” es el número de celdas en paralelo.

Mediante estudio determina el Punto de funcionamiento en el que se aprovecha la máxima potencia posible, teniendo en cuenta que ni el punto de mayor tensión ni el mayor corriente tienen porque entregar el máximo.

## 4.2. Conceptos de convertidores eléctricos

Este tipo de dispositivos sirven para transformar los parámetros eléctricos de la energía eléctrica, ya que no toda la electricidad es igual.

Algunos ejemplos de esos diferentes parámetros eléctricos son, por ejemplo, que para electrónica se emplea tensión continua y normalmente de bajo o incluso ultra-bajo voltaje ya que es adecuada para los cálculos que realizan los transistores de un microprocesador.

Para la red del hogar se emplea red alterna monofásica de 230 V / 50 Hz debido a su facilidad de transformación en todos los tipos de energía, su mayor tensión y menor riesgo eléctrico que la continua y su facilidad de instalación.

Para redes industriales generalmente se emplean redes trifásicas de 400 V / 50 Hz ya que son capaces de transmitir mayor potencia y son muy adecuadas para el accionamiento y movimiento de máquinas eléctricas.

Como último ejemplo, para el transporte de energía se emplean redes alternas trifásicas de muy alta tensión ya que se disminuye considerablemente el efecto joule generado por la corriente, ya que en la ecuación del efecto joule la corriente esta elevada al cuadrado [11].

$$Q_c = I^2 \cdot R \cdot t \rightarrow \text{siendo } (Calor = Intensidad^2 \cdot Resistencia \cdot tiempo) \quad [5]$$

En la siguiente figura se puede ver la variación exponencial en las perdidas por el efecto joule a consecuencia del aumento en la corriente eficaz.

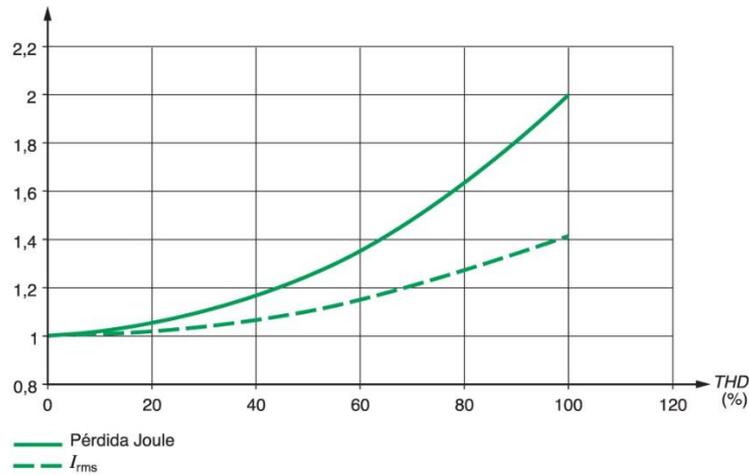


Fig. 4.2.1. Perdidas en el cable por el efecto joule respecto del aumento en la corriente [12]

Cuanta mayor tensión y menor corriente, menos perdidas a igualdad de potencia.

En el diagrama, se muestra en función de la distorsión armónica [12].

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2} - 1 \quad [6]$$

El aumento en la corriente eficaz genera una carga sobre el material conductor, sin tener en cuenta el efecto pelicular, se puede ver como las corrientes armónicas producen un aumento en las perdidas de joule.

Para explicar los tipos de convertidores eléctricos de forma general y sencilla; existen cuatro tipos de convertidores eléctricos:

- **AC-DC:** los rectificadores sirven para convertir tensión alterna, monofásica o trifásica, en tensión continua.
- **DC-DC:** se transforma tensión continua (generalmente no regulada) en otra tensión continua (y regulada).
- **DC-AC:** generalmente se conocen como inversores, transforman la tensión continua en redes monofásicas o trifásicas de corriente alterna, con la amplitud y frecuencia variables.
- **AC-AC:** conocidos como reguladores de alterna, modifican la tensión alterna de red en una nueva tensión alterna de la misma frecuencia y con un valor eficaz regulado.

Además de los tipos de convertidores eléctricos, también son esenciales los transformadores, sin estos, sería impensable el transporte de energía.

#### 4.2.1. AC-DC

La rectificación de la tensión, es el proceso de convertir la tensión alterna en tensión continua por medio de interruptores, generalmente se emplean diodos o tiristores.

Se puede dividir en dos grupos, rectificadores monofásicos y rectificadores trifásicos.

##### *Rectificadores monofásicos:*

Se distinguen dos tipos dentro de este grupo, los de media onda y los de onda completa [13].

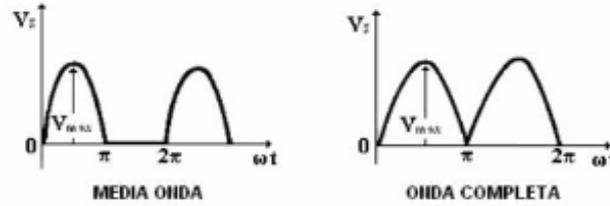


Fig. 4.2.2. Concepto media onda (izquierda) y onda completa (derecho)

Como se puede ver, si se emplea el rectificador de media onda, se desaprovecha toda la onda negativa, por lo que el rendimiento en los rectificadores de onda completa es mayor.

### Rectificador monofásico de media onda

Este tipo de rectificador solo aprovecha la mitad de la onda, por lo que es muy raro encontrar cualquier sistema con este tipo de rectificador, ya que el coste de un rectificador de doble onda es prácticamente el mismo.

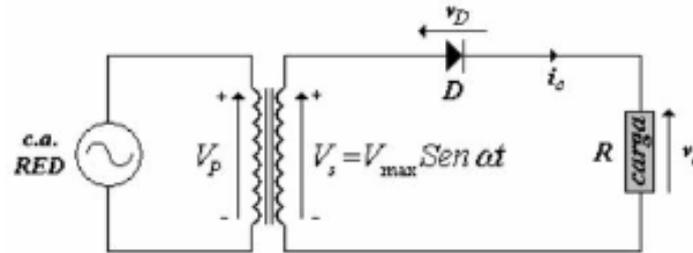


Fig. 4.2.3. Rectificador media onda

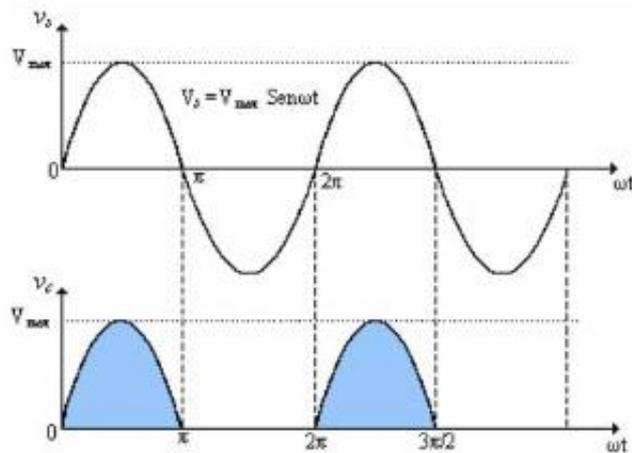


Fig. 4.2.4. Forma de onda de la tensión en la carga respecto de la entrada

La tensión media en la carga, representa el valor de componente continua en la carga, se obtiene mediante la integral:

$$V_{dc} = \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^T V_{max} \text{Sen} \omega t d\omega t \quad [7]$$

El valor de la tensión eficaz en la carga:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} (V_{max} \cdot \text{Sen}wt)^2 \cdot dwt} \quad [8]$$

El valor medio de la corriente en la carga será:

$$I_{dc} = \frac{I_{max}}{\pi} \quad [9]$$

El valor eficaz de la corriente en la carga es:

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{2} \quad [10]$$

### Rectificador monofásico de onda completa

Este tipo de rectificadores, los de onda completa, o también llamados rectificadores de doble onda [13], son los que se emplean generalmente, aunque los hay de varios tipos de distribuciones, el más conocido es el puente de graetz.

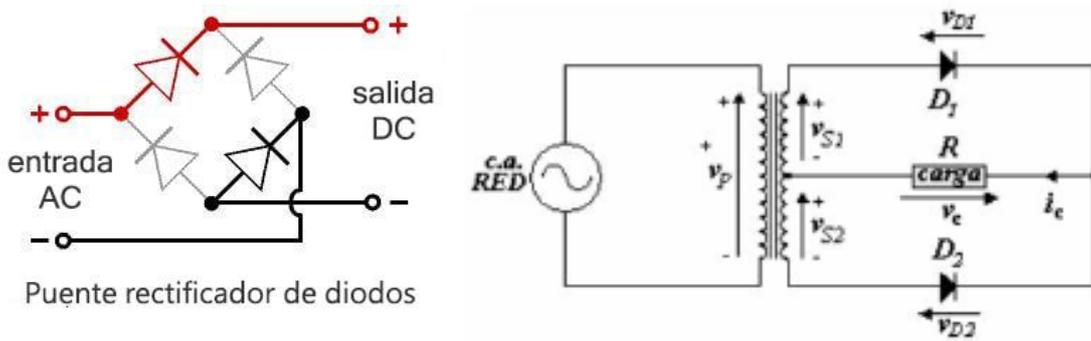


Fig. 4.2.5. Rectificador de onda completa (derecha) y puente de graetz (izquierda)

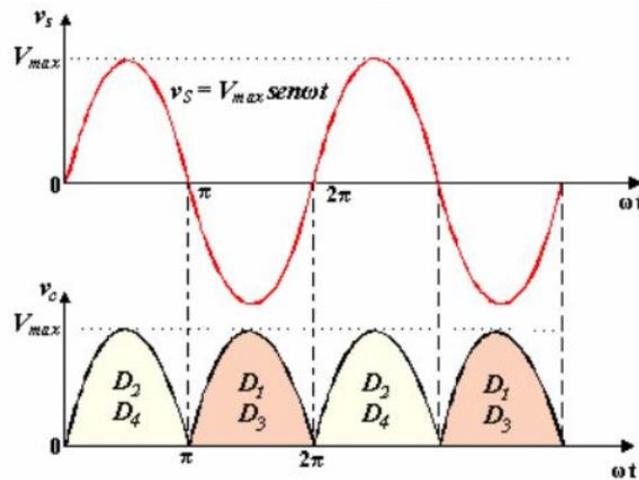


Fig. 4.2.6. Forma de onda en la carga respecto de la entrada

La tensión media en la carga, se obtiene mediante la integral:

$$V_{dc} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{max} \text{Sen}wt \, dwt \quad [11]$$

El valor de la tensión eficaz en la carga:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} (V_{max} \cdot \text{Sen}wt)^2 \cdot dwt} \quad [12]$$

El valor medio de la corriente en la carga será:

$$I_{dc} = \frac{I_{max}}{\pi} \quad [13]$$

El valor eficaz de la corriente en la carga es:

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{2\sqrt{2}} \quad [14]$$

Tras el rectificado, se realiza el filtrado [14], con el que se logra una tensión casi continua, en la que  $V_r$  es el rizado de la tensión. Cuanto menor sea el rizado más continua es la tensión.

La forma de onda a la salida del rectificador es (izquierda) y la forma de onda que ve el condensador, y su tensión media (derecha).

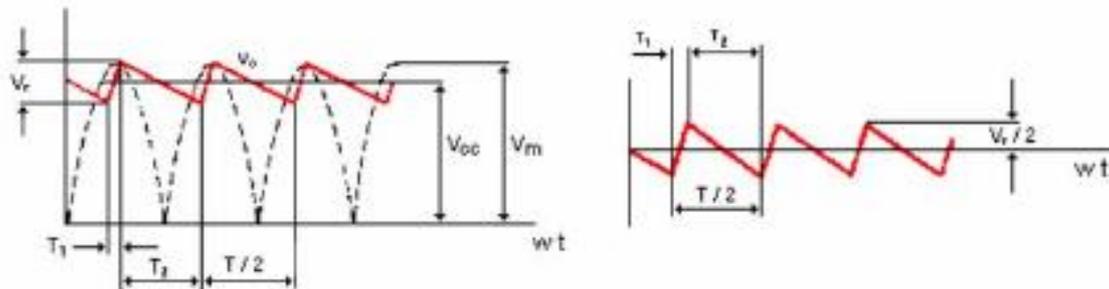


Fig. 4.2.7. Filtrado de onda para rectificadores

La expresión para calcular el valor de la tensión de rizado pico-pico es.

$$V_{R(p-p)} = \frac{V_{p(entrada)} \cdot T}{R \cdot C} \quad [15]$$

### Rectificadores trifásicos:

Se distinguen varios tipos dentro de este grupo, en primer lugar, rectificadores de media onda o de onda completa, [15] y dentro del tipo de onda completa se distinguen tres más, no controlado, controlado y semicontrolado.

### Rectificadores trifásicos de media onda

También se conocen como rectificadores P3, que se refiere a paralelo simple tres fases.

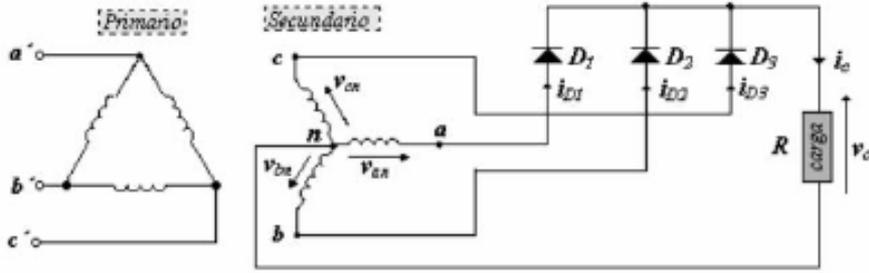


Fig. 4.2.8. Rectificador trifásico P3

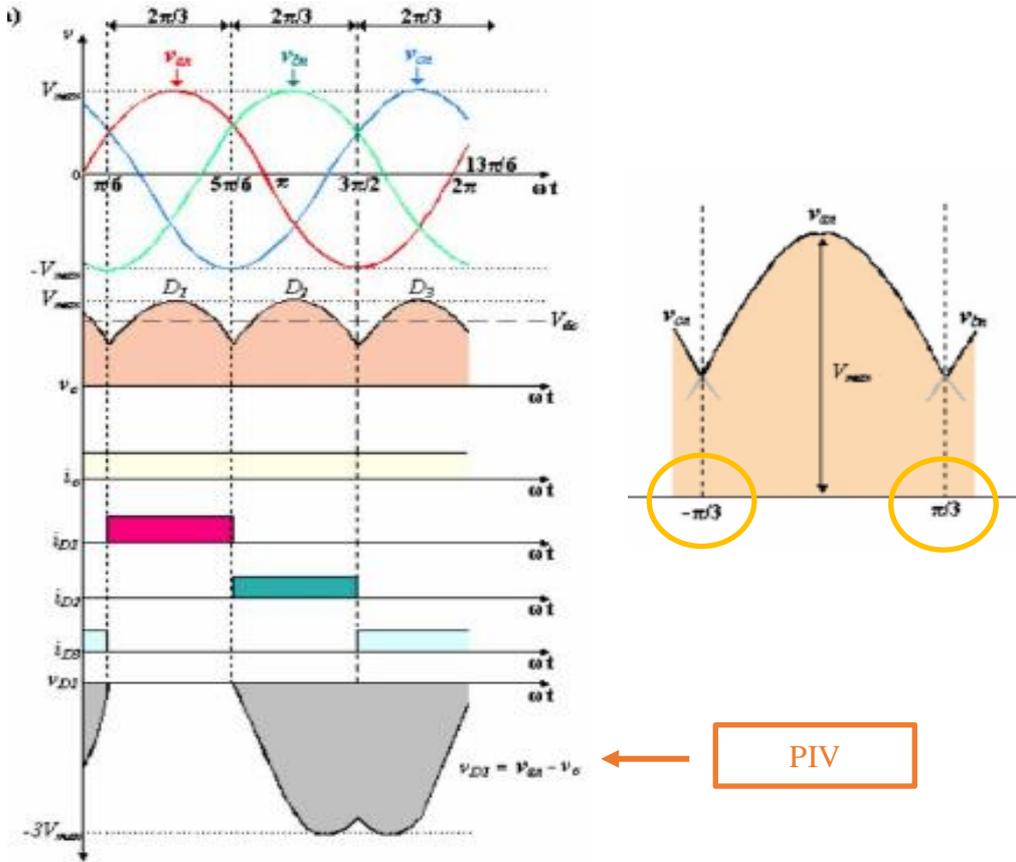


Fig. 4.2.9. Formas de onda P3

La tensión media en la carga es:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} V_{max} \cdot \cos dwt = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_{max}}{2\pi} \quad [16]$$

La corriente en el secundario:

$$I_s = \frac{I_c}{3} \quad [17]$$

La corriente en el primario:

$$I_p = \frac{I_c}{3} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad [18]$$

La corriente por la red  $\Delta$ :

$$I_{red \Delta} = \sqrt{3} \cdot I_p \quad [19]$$

La corriente por la red Y:

$$I_{red Y} = I_p \quad [20]$$

*Rectificadores trifásicos de onda completa no controlado*

Al igual que los monofásicos, aquí se aprovechan los semiciclos negativos. También se conocen como rectificadores PD3, que significa paralelo doble de tres fases.

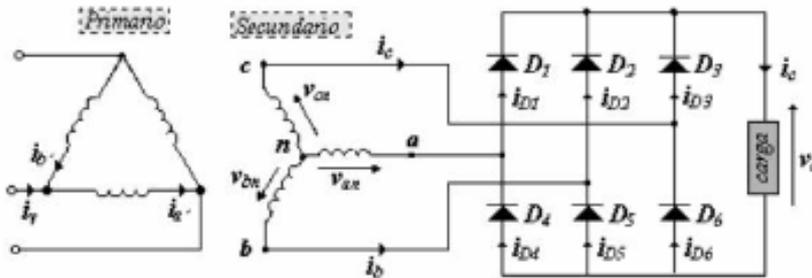


Fig. 4.2.10. Rectificador trifásico PD3 no controlado

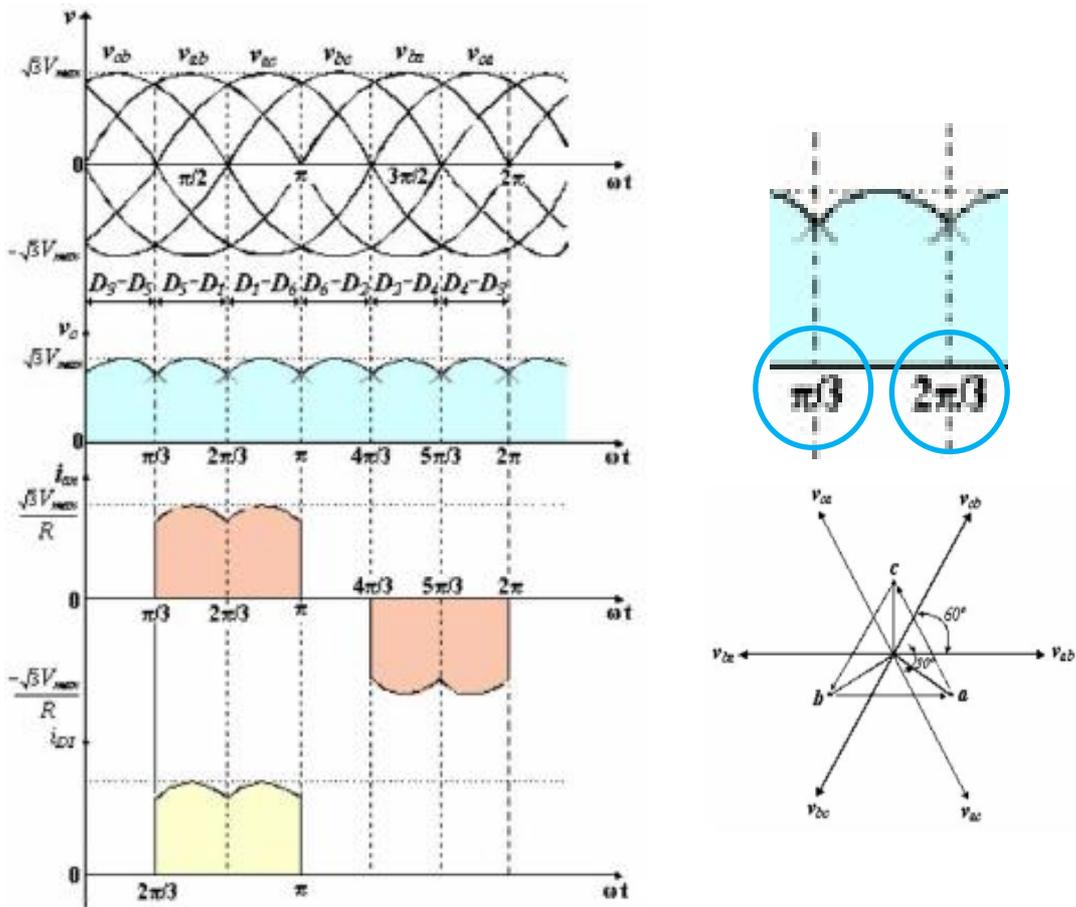


Fig. 4.2.11. Forma de onda PD3 No controlado

La tensión media en la carga es:

$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{2\pi}{6}} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3} \cdot V_{max} \cdot \sin dwt = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_{max}}{\pi} \quad [21]$$

La corriente en el secundario:

$$I_s = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_c \quad [22]$$

La corriente en el primario:

$$I_p = I_c \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad [23]$$

La corriente por la red  $\Delta$ :

$$I_{red \Delta} = \sqrt{3} \cdot I_p \quad [24]$$

La corriente por la red Y:

$$I_{red Y} = I_p \quad [25]$$

Círculo de potencias

Se trata de una representación gráfica en la que se pueden incluir todas las potencias activa, reactiva y aparente, y, además, la potencia aparente total y la distorsión armónica.

La ecuación que relaciona el ángulo del primer armónico con las pérdidas por conmutación no instantánea surge de la siguiente relación:

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad [26]$$

$$P_1 = V_{lc} \cdot I_c \quad [27]$$

Igualando estas dos ecuaciones 26 y 27:

$$S_1 \cdot \cos \varphi_1 = V_{lc} \cdot I_c \quad [28]$$

$$(V_{lc0} - \Delta Vx) \cdot I_c = V_{lc0} \cdot I_c \cdot \cos \varphi_1 \quad [29]$$

Se obtiene la relación del ángulo del primer armónico con las pérdidas por conmutación no instantánea:

$$\cos \varphi_1 = 1 - \frac{\Delta Vx}{V_{lc0}} \quad [30]$$

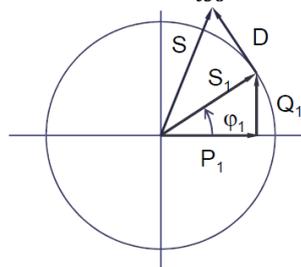


Fig. 4.2.12. Círculo de potencia

Potencia aparente asociada al primer armónico:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = V_{lc0} \cdot I_c \quad [31]$$

Potencia activa asociada al primer armónico:

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = V_{lc} \cdot I_c \quad [32]$$

Potencia reactiva asociada al primer armónico:

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad [33]$$

Potencia aparente total:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{red} \quad [34]$$

Distorsión armónica total:

$$D = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{armónica} \quad [35]$$

### Rectificadores trifásicos de onda completa controlados

Rectificador trifásico PD3 controlado, en este caso se emplean seis tiristores en lugar de diodos.

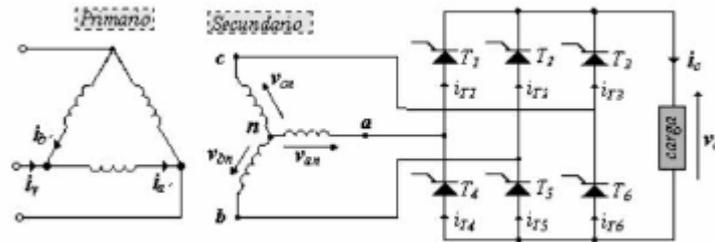


Fig. 4.2.13. Rectificador trifásico PD3 totalmente controlado

La tensión media en la carga es:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3} \cdot V_{max} \cdot \text{sen } dwt = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_{max}}{\pi} \quad [36]$$

La corriente en el secundario:

$$I_s = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_c \quad [37]$$

La corriente en el primario:

$$I_p = I_c \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad [38]$$

La corriente por la red  $\Delta$ :

$$I_{red \Delta} = \sqrt{3} \cdot I_p \quad [39]$$

La corriente por la red Y:

$$I_{red Y} = I_p \quad [40]$$

Circulo de potencias

La ecuación que relaciona el ángulo del primer armónico con las pérdidas por conmutación no instantánea y el ángulo de disparo de los tiristores, surge de la siguiente relación:

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad [41]$$

$$P_1 = V_{lc} \cdot I_c \quad [42]$$

Igualando estas dos ecuaciones:

$$S_1 \cdot \cos \varphi_1 = V_{lc} \cdot I_c \quad [43]$$

$$(V_{lc0} \cdot \cos \Psi - \Delta Vx) \cdot I_c = V_{lc0} \cdot I_c \cdot \cos \varphi_1 \quad [44]$$

Se obtiene la relación del ángulo del primer armónico con las pérdidas por conmutación no instantánea:

$$\cos \varphi_1 = \cos \Psi - \frac{\Delta Vx}{V_{lc0}} \quad [45]$$

Potencia aparente asociada al primer armónico:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = V_{lc0} \cdot I_c \quad [46]$$

Potencia activa asociada al primer armónico:

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = V_{lc} \cdot I_c \quad [47]$$

Potencia reactiva asociada al primer armónico:

$$Q_1 = S_1 \cdot \sen \varphi_1 \quad [48]$$

Potencia aparente total:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{red} \quad [49]$$

Distorsión armónica total:

$$D = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{armónica} \quad [50]$$

### Rectificadores trifásicos de onda completa semi-controlados

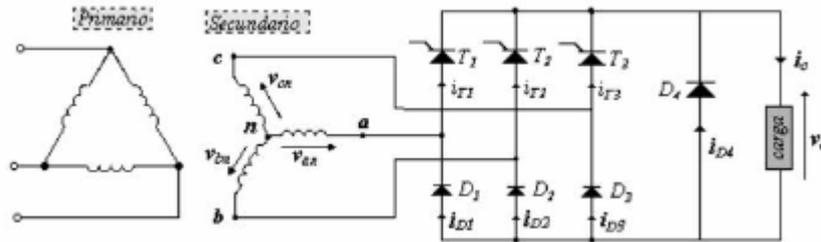


Fig. 4.2.14. Rectificador trifásico PD3 semicontrolado

La tensión media en la carga es:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3} \cdot V_{max} \cdot \sen dwt = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_{max}}{\pi} \quad [51]$$

La corriente en el secundario:

$$I_s = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_c \quad [52]$$

La corriente en el primario:

$$I_p = I_c \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad [53]$$

Si el ángulo de disparo de los tiristores es menor o igual a 60º, las corrientes de red son las siguientes:

La corriente por la red Δ:

$$I_{red \Delta} = \sqrt{3} \cdot I_p \quad [54]$$

La corriente por la red Y:

$$I_{red Y} = I_p \quad [55]$$

Si el ángulo de disparo de los tiristores es mayor a 60º, las corrientes de red son las siguientes:

La corriente por la red Δ:

$$I_{red \Delta} = \sqrt{3} \cdot I_p \cdot \sqrt{1,5 \cdot \frac{\pi - \Psi}{\pi}} \quad [56]$$

La corriente por la red Y:

$$I_{red Y} = I_p \cdot \sqrt{1,5 \cdot \frac{\pi - \Psi}{\pi}} \quad [57]$$

### Círculo de potencias

La ecuación que relaciona el ángulo del primer armónico con las pérdidas por conmutación no instantánea y el ángulo de disparo de los tiristores, surge de la siguiente relación:

$$P_1 = S_1 \cdot (\cos \varphi_1)^2 \quad [58]$$

$$P_1 = \left( V_{lc} \cdot \frac{1 + \cos \Psi}{2} - \Delta Vx \right) \cdot I_c \quad [59]$$

Igualando estas dos ecuaciones 58 y 59:

$$S_1 \cdot (\cos \varphi_1)^2 = \left( V_{lc} \cdot \frac{1 + \cos \Psi}{2} - \Delta Vx \right) \cdot I_c \quad [60]$$

Se obtiene la relación del ángulo del primer armónico con las pérdidas por conmutación no instantánea:

$$(\cos \varphi_1)^2 = \frac{1 + \cos \Psi}{2} - \frac{\Delta Vx}{V_{lc0}} \quad [61]$$

El círculo de potencias, la potencia aparente se mueve en un semicírculo, cuando no funciona, la potencia aparente es paralela al eje de abscisas, y cuando comienza a funcionar, se desliza sobre el semicírculo negro, los valores con prima representan al rectificador en funcionamiento.

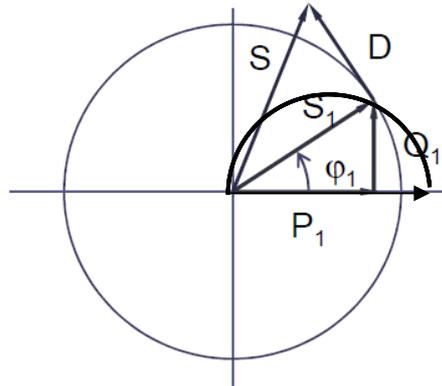


Fig. 4.2.15. Círculo de potencias para rectificadores semicontrolados

Potencia aparente asociada al primer armónico:

$$S_1 = V_{lc0} \cdot I_c \quad [62]$$

Potencia aparente asociada al primer armónico en el punto de funcionamiento:

$$S_1' = S_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad [63]$$

Potencia activa asociada al primer armónico:

$$P_1' = S_1' \cdot \cos \varphi_1 \quad [64]$$

Potencia reactiva asociada al primer armónico:

$$Q_1 = S_1' \cdot \sen \varphi_1 \quad [65]$$

Potencia aparente total:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{red}' \quad [66]$$

Distorsión armónica total:

$$D = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{armónica} \quad [67]$$

### 4.2.2. DC-DC

#### *PWM, Modulación por ancho de pulso*

Para crear una señal PWM [16] se emplea una señal portadora triangular de una frecuencia definida, donde se compara con una tensión de referencia variable que es la que regulará en qué momento comienza y termina el pulso, como se puede ver en la siguiente figura.

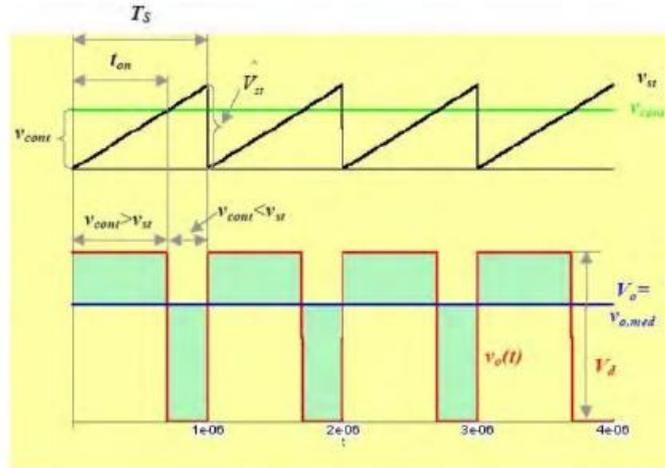


Fig. 4.2.16. PWM modulación por ancho de pulso

Formas de ondas generales de los convertidores DC DC

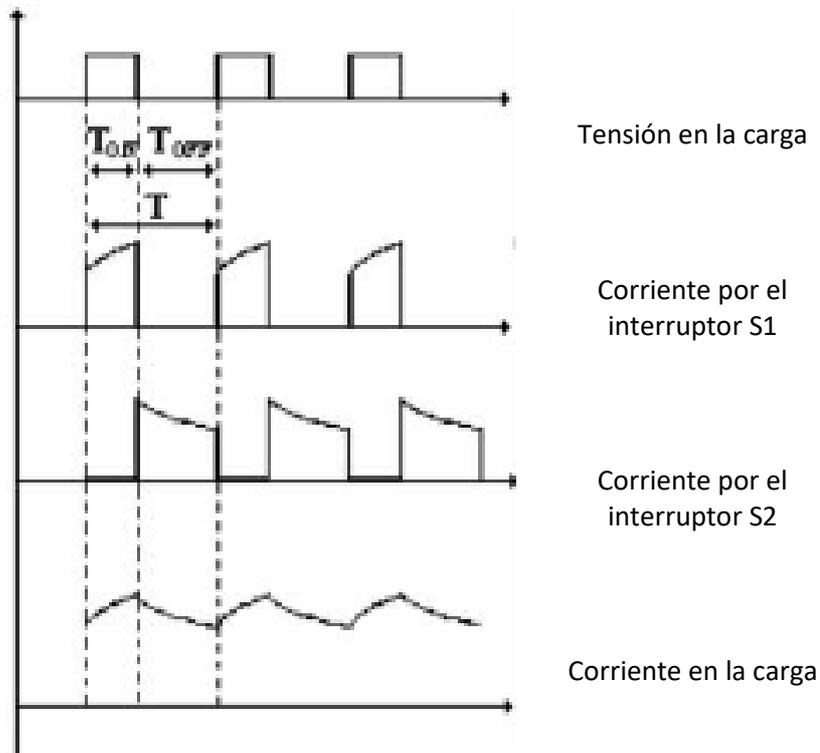


Fig. 4.2.17. Formas de onda generales DC-DC

El duty cycle se define como.

$$\delta = \frac{T_{ON}}{T} \quad [68]$$

*Concepto de conducción continua*

La corriente por la bobina debe ser siempre superior a cero, es decir, la bobina no puede tener discontinuidades en las corrientes porque esto afectaría a la eficiencia del dispositivo. Como se puede ver en la siguiente figura [17].

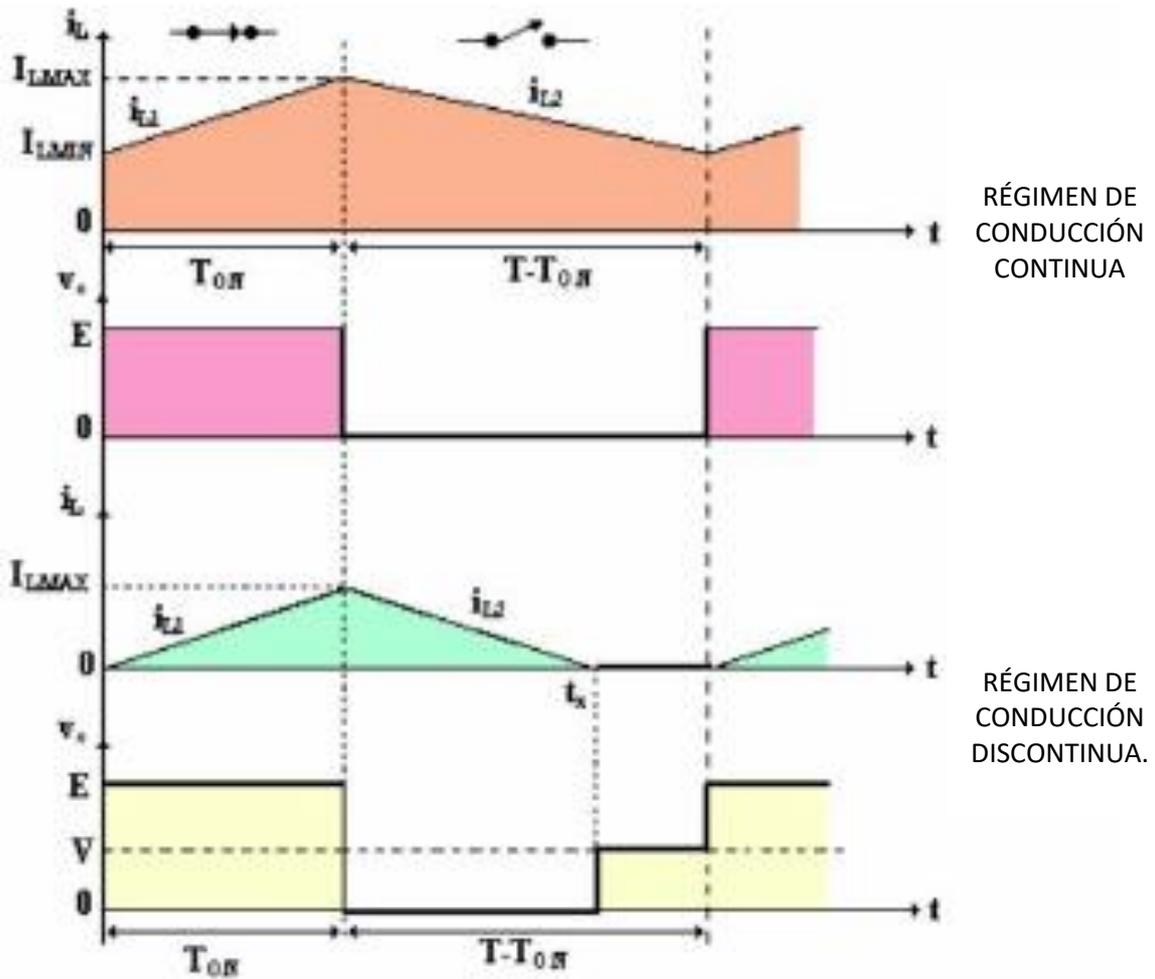


Fig. 4.2.18. Concepto regimen de conducción continua

Definiendo mediante la siguiente expresión la corriente eficaz por la bobina que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la corriente media por la bobina (definida diferente en cada caso) y la corriente eficaz por el condensador (igual para todos los tipos):

$$I_{eficaz\ bobina}^2 = I_{corriente\ media\ bobina}^2 + I_{eficaz\ condensador}^2 \quad [69]$$

$$Siendo \rightarrow I_{eficaz\ condensador}^2 = \frac{\left(\frac{\Delta i_L}{2}\right)^2}{\sqrt{3}} \quad [70]$$

### Reductor de tensión, también conocido como Buck

En los convertidores DC-DC reductores se obtiene a la salida un voltaje menor de lo que se tiene a la entrada. Para que se dé un buen funcionamiento del convertidor es necesario que el mismo esté trabajando en modo de conducción continua, es decir, que la corriente que atraviesa el inductor (la bobina) nunca llegue a cero.

En el funcionamiento del convertidor se diferencian dos estados, cuando el dispositivo de conmutación permite la circulación de corriente (ON) y cuando se comporta de manera que aísla la tensión de entrada (OFF).

La bobina se opone a los cambios de corriente por lo que el nivel de tensión que acumulará depende del tiempo que se mantenga cerrado el transistor.

**ON:** el transistor, elemento de conmutación, se encuentra en estado activo, por lo que permite el paso de corriente desde la fuente de tensión hacia la carga, pasando por el inductor. En este caso el condensador se encuentra en fase de carga.

**OFF:** el transistor, en modo de corte, no deja circular corriente hacia la carga, aísla la fuente de tensión del resto del circuito. En este momento la carga se ve alimentada por la tensión acumulada en el condensador.

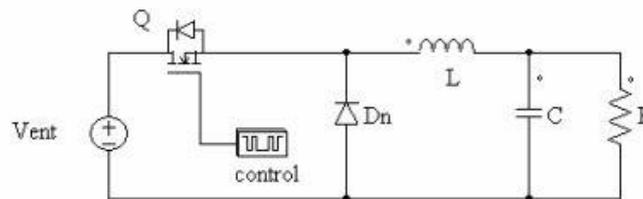


Fig. 4.2.19. Reductor de tensión "buck"

La ecuación que define la tensión de entrada con la tensión de salida es.

Circuito cerrado:

$$Vl = Vi - Vo \rightarrow \Delta iLc = \frac{(Vi - Vo) \cdot D \cdot T}{L} \quad [71]$$

Circuito abierto:

$$Vl = -Vo \rightarrow \Delta iLa = \frac{-Vo \cdot (1 - D) \cdot T}{L} \quad [72]$$

Igualando  $Vl$  para obtener la relación entrada salida.

$$\frac{(Vi - Vo) \cdot D \cdot T}{L} = \frac{-Vo \cdot (1 - D) \cdot T}{L} \quad [73]$$

$$Vo = Vi \cdot D \quad [74]$$

La ecuación que define la resistencia equivalente del sistema es.

$$P = \frac{Vo^2}{R} \rightarrow R = \frac{Vo^2}{P} \quad [75]$$

La ecuación que define la tensión mínima por la bobina es la tensión media por la bobina menos la mitad de la variación de tensión por la bobina:

$$Il - \frac{\Delta iL}{2} = 0 \quad [76]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow Il = \frac{Vo}{R} \quad [77]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow \Delta iL = \frac{Vo}{L} \cdot (1 - D) \cdot T \quad [78]$$

Introduciendo los valores en la expresión principal:

$$L_{min} = \frac{(1 - D) \cdot R}{2 \cdot f} \quad [79]$$

La expresión que define la variación de la tensión de salida está definida por el área bajo la curva de la corriente por la bobina, de la siguiente forma.

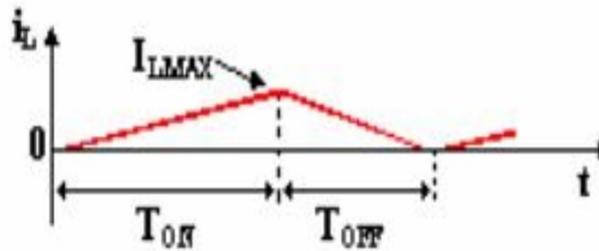


Fig. 4.2.20. Variación de la corriente por la bobina

$$\frac{\Delta Vo}{Vo} \rightarrow Q = C \cdot V \rightarrow \Delta Q = C \cdot \Delta Vo \quad [80]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{\Delta iL}{2} \quad [81]$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{\Delta iL}{2} = C \cdot \Delta Vo \rightarrow \text{Siendo} \rightarrow Vo = Vi \cdot D \quad [82]$$

$$\frac{\Delta Vo}{Vo} = \frac{1 - D}{8 \cdot f^2 \cdot L \cdot C} \quad [83]$$

Por ultimo las expresiones que definen la corriente por los semiconductores y la tensión inversa máxima del diodo.

$$I_{transistor} = Il \cdot D \quad [84]$$

$$I_{diodo} = Il \cdot (1 - D) \quad [85]$$

$$PIV = Vi \quad [86]$$

### *Elevador de tensión, también conocido como Boost*

Con este diseño se obtiene un mayor voltaje a la salida que en la entrada del circuito, es decir, elevan la tensión.

La bobina se opone a los cambios de corriente por lo que el nivel de tensión que acumulará depende del tiempo que se mantenga cerrado el transistor, la elevación de tensión se debe a breves cortocircuitos.

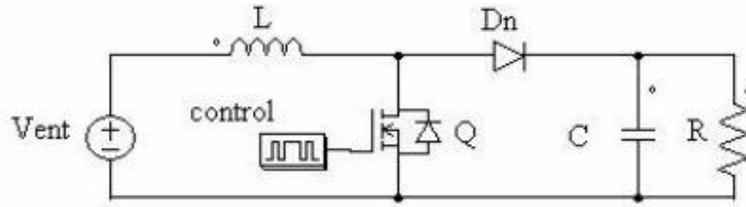


Fig. 4.2.21. Esquema del elevador de tensión

Se diferencian los mismos casos para la conmutación del transistor que en el Buck.

**ON:** la bobina almacena energía recibida por la fuente, a la vez que la carga es alimentada por el condensador. La fuente de tensión queda en corto circuito, y la segunda parte del circuito aislada de esta primera.

**OFF:** en este caso el único camino posible para la corriente es a través del diodo hacia la carga. El condensador se cargará en esta fase.

La ecuación que define la tensión de entrada con la tensión de salida es.

Circuito cerrado:

$$Vl = Vi \rightarrow \Delta iLc = \frac{Vi \cdot D \cdot T}{L} \quad [87]$$

Circuito abierto:

$$Vl = Vi - Vo \rightarrow \Delta iLa = \frac{(Vi - Vo) \cdot (1 - D) \cdot T}{L} \quad [88]$$

Igualando  $Vl$  para obtener la relación entrada salida.

$$\frac{Vi \cdot D \cdot T}{L} = \frac{(Vi - Vo) \cdot (1 - D) \cdot T}{L} \quad [89]$$

$$Vo = \frac{Vi}{1 - D} \quad [90]$$

La ecuación que define la resistencia equivalente del sistema es.

$$P = \frac{Vo^2}{R} \rightarrow R = \frac{Vo^2}{P} \quad [91]$$

La ecuación que define la tensión mínima por la bobina es:

$$Il - \frac{\Delta iL}{2} = 0 \quad [92]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow Il = \frac{Vi}{(1 - D)^2 \cdot R} \quad [93]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow \Delta iL = \frac{Vi}{L} \cdot D \cdot T \quad [94]$$

Introduciendo los valores en la expresión principal:

$$Lmin = \frac{(1 - D)^2 \cdot R \cdot D}{2 \cdot f} \quad [95]$$

La siguiente expresión define la variación de la tensión de salida.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} \rightarrow Q = C \cdot V \rightarrow \Delta Q = C \cdot \Delta V_o \quad [96]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow Q = \frac{V_o}{R} \cdot D \cdot T \quad [97]$$

$$\frac{V_o}{R} \cdot D \cdot T = C \cdot \Delta V_o \rightarrow \text{Siendo} \rightarrow V_o = V_i \cdot D \quad [98]$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R \cdot C \cdot f} \quad [99]$$

Por ultimo las expresiones que definen la corriente por los semiconductores y la tensión inversa máxima del diodo.

$$I_{transistor} = I_l \cdot D \quad [100]$$

$$I_{diodo} = I_l \cdot (1 - D) \quad [101]$$

$$PIV = V_o \quad [102]$$

### *Elevador-reductor de tensión, también conocido como Buck-Boost*

En los convertidores reductores-elevadores, el voltaje de salida puede ser mayor o menor que el voltaje de la entrada, esto dependerá del duty-cycle con el que se trabaje.

El voltaje de salida es ajustable variando el ciclo de trabajo del transistor de conmutación; de hecho, si  $D < 0,5$  la tensión de salida es menor que la de entrada; en cambio, si  $D > 0,5$  la tensión de salida es mayor que la de entrada.

Durante el estado ON, la fuente de entrada de voltaje está directamente conectada al inductor (L). Por lo que se almacena la energía en L.

En este paso, el condensador proporciona corriente a la carga de salida. Durante el estado OFF, el inductor está conectado a la carga de salida y el condensador, por lo que la energía es transferida de L a C y R.

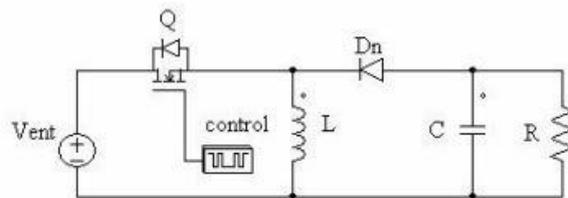


Fig. 4.2.22. Esquema del elevador reductor de tensión

La ecuación que define la tensión de entrada con la tensión de salida es.

Circuito cerrado:

$$V_l = V_i \rightarrow \Delta i_{Lc} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} \quad [103]$$

Circuito abierto:

$$V_l = V_o \rightarrow \Delta i_{La} = \frac{V_o \cdot (1 - D) \cdot T}{L} \quad [104]$$

Igualando  $V_l$  para obtener la relación entrada salida.

$$\frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} = \frac{V_o \cdot (1 - D) \cdot T}{L} \quad [105]$$

$$V_o = -V_i \cdot \frac{D}{1 - D} \quad [106]$$

La ecuación que define la resistencia equivalente del sistema es.

$$P = \frac{V_o^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_o^2}{P} \quad [107]$$

La ecuación que define la tensión mínima por la bobina es:

$$Il - \frac{\Delta iL}{2} = 0 \quad [108]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow Il = \frac{V_i \cdot D}{(1 - D)^2 \cdot R} \quad [109]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow \Delta iL = \frac{V_i}{L} \cdot D \cdot T \quad [110]$$

Introduciendo los valores en la expresión principal:

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad [111]$$

La siguiente expresión define la variación de la tensión de salida.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} \rightarrow Q = C \cdot V \rightarrow \Delta Q = C \cdot \Delta V_o \quad [112]$$

$$\text{Siendo} \rightarrow Q = \frac{V_o}{R} \cdot D \cdot T \quad [113]$$

$$\frac{V_o}{R} \cdot D \cdot T = C \cdot \Delta V_o \rightarrow \text{Siendo} \rightarrow V_o = V_i \cdot D \quad [114]$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R \cdot C \cdot f} \quad [115]$$

Por ultimo las expresiones que definen la corriente por los semiconductores y la tensión inversa máxima del diodo.

$$I_{transistor} = Il \cdot D \quad [116]$$

$$I_{diodo} = Il \cdot (1 - D) \quad [117]$$

$$PIV = V_o \quad [118]$$

### 4.2.3. DC-AC

Los inversores son circuitos que transforman la tensión continua en tensión alterna mediante el uso de interruptores electrónicos. El principio de funcionamiento básico, para un inversor monofásico es el siguiente, la tensión continua se alterna con polaridades inversas a la salida, de forma que simule una señal alterna senoidal [18].

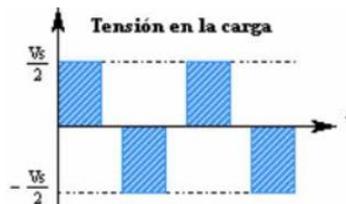


Fig. 4.2.23. Tensión en la carga del inversor

Se explicarán solo los conceptos y los inversores monofásicos y trifásicos más utilizados al igual que sus modulaciones.

*Inversores monofásicos:*

Para un puente monofásico típico como el siguiente, cuatro interruptores (IGBT) que conmutan por parejas invirtiendo la tensión continua de la entrada con polaridades inversas a la salida; las formas de onda de salida y los interruptores es.

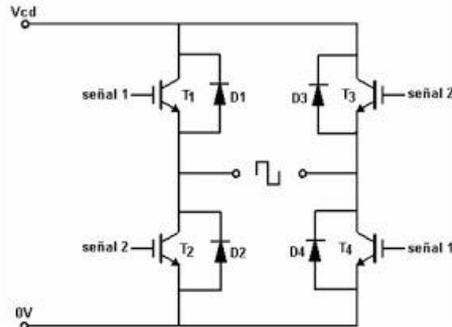


Fig. 4.2.24. Esquema inversor monofásico

Los transistores conmutan por parejas, alternando la tensión a la salida, como se puede ver en la siguiente figura.

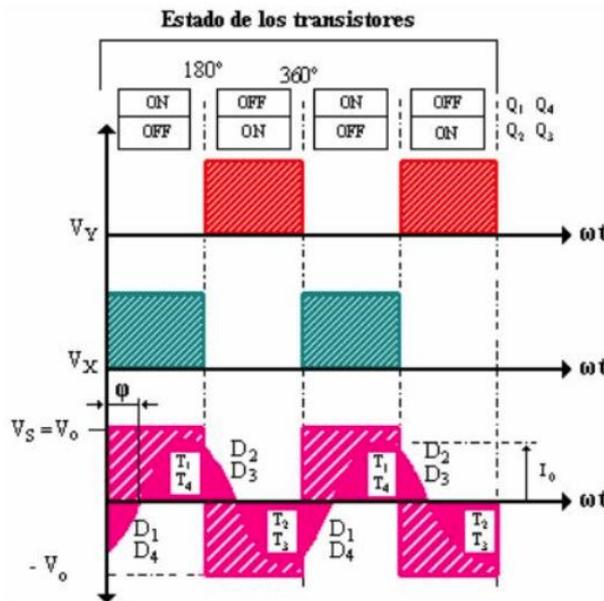


Fig. 4.2.25. Formas de onda

La tensión eficaz a la salida viene dada por la expresión.

$$V_{S_{RMS}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T V_S^2 \cdot dt} \quad [119]$$

Generalmente se emplean inversores con modulación PWM, ya que permiten obtener una tensión de salida eficaz senoidal muy pura, la modulación PWM, como se ha explicado previamente, se basa en una portadora triangular de alta frecuencia que se compara con una

señal continua de referencia que en este caso varía linealmente para así obtener una modulación de ancho de pulso más ancha en la parte alta y baja de la senoidal y más estrecha en la parte media de la onda senoidal, como se puede apreciar en la siguiente figura.

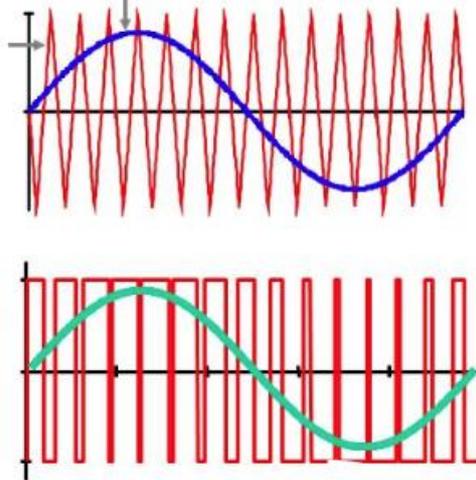


Fig. 4.2.26. Inversor monofásico con modulación PWM

### Inversores trifásicos

Al igual que los inversores monofásicos, los inversores trifásicos alternan la tensión continua de la entrada en tensión alterna a la salida [19], salvo que lo hacen conmutando seis interruptores (IGBT en la fig.4.2.27) en parejas, para generar tres ondas senoidales desfasadas 120°.

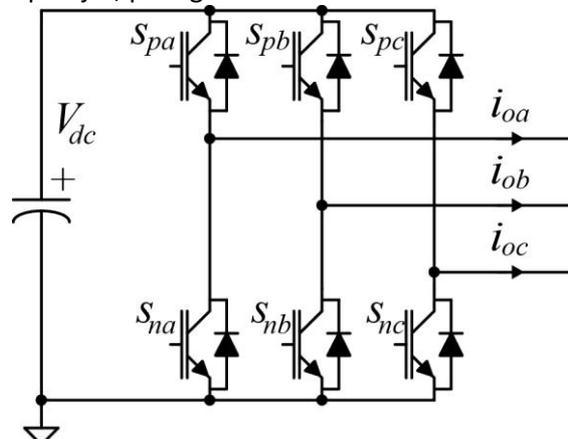


Fig. 4.2.27. Esquema inversor trifásico con IGBTs

En los inversores trifásicos se emplean varias técnicas de modulación, aunque generalmente se emplean dos; la modulación PWM y la modulación Six-Step.

En la modulación PWM, al igual que se ha explicado en el apartado monofásico, se conmuta una señal PWM que será más ancha en los extremos de la senoidal y mas estrecha en la mitad de la senoidal, como se puede ver en la siguiente figura.

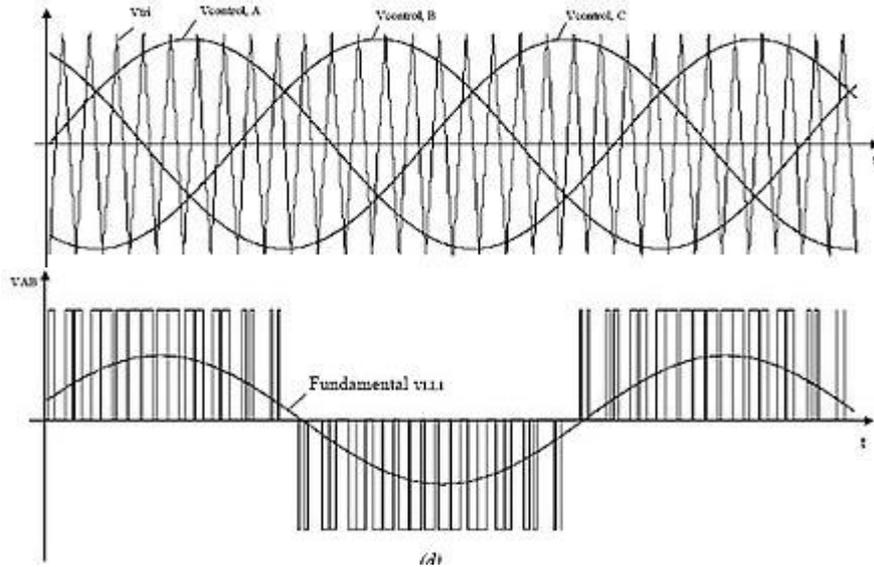


Fig. 4.2.28. Formas de onda inversor trifásico con modulación PWM

La expresión que define la tensión inversada de salida respecto de la tensión continua de entrada es la siguiente, donde el parámetro  $m_a$ , es el parámetro modulador que puede modificar a gusto del consumidor la tensión de salida, siendo  $m_a$  máxima igual a uno.

$$PWM \rightarrow V_{ab\text{salida}} \cdot \text{sen}(wt) = \sqrt{3} \cdot m_a \cdot \frac{V_{\text{entrada}}}{2} \quad [120]$$

El segundo tipo de modulación más utilizado es la modulación six-step, o modulación por impulso único, donde el parámetro modulador es fijo, y la salida depende ciegamente de la tensión de entrada. Como se puede ver en la siguiente expresión que relaciona la tensión de salida con la tensión de entrada.

$$SixStep \rightarrow V_{ab\text{salida}} \cdot \text{sen}(wt) = \sqrt{3} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_{\text{entrada}}}{2} \quad [121]$$

Como se puede ver en las siguientes gráficas, la tensión de salida, se trata de una relación directa entre el momento que se produce el pulso de los interruptores y la forma de onda de la salida, S1-S6 comprende los seis interruptores del sistema, que van conmutados desfasados, 180º los superiores y los inferiores 120º respecto de los superiores.

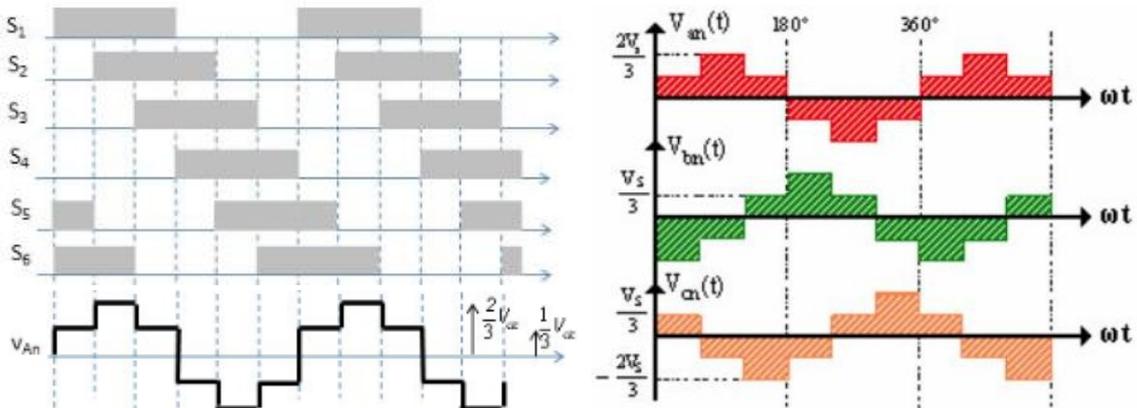


Fig. 4.2.29. Formas de onda inversor trifásico con modulación Six-Step

#### 4.2.4. AC-AC

Los convertidores AC-AC, se pueden dividir en dos grupos, reguladores de tensión y cicloconvertidores.

Por un lado, los reguladores de tensión solo pueden variar el valor eficaz de la tensión de salida, por otro lado, los cicloconvertidores pueden variar la frecuencia de salida.

Generalmente se emplean tiristores o triacs como interruptores para la conmutación, un triac son dos tiristores en antiparalelo que puede conducir corriente en ambos sentidos [20].

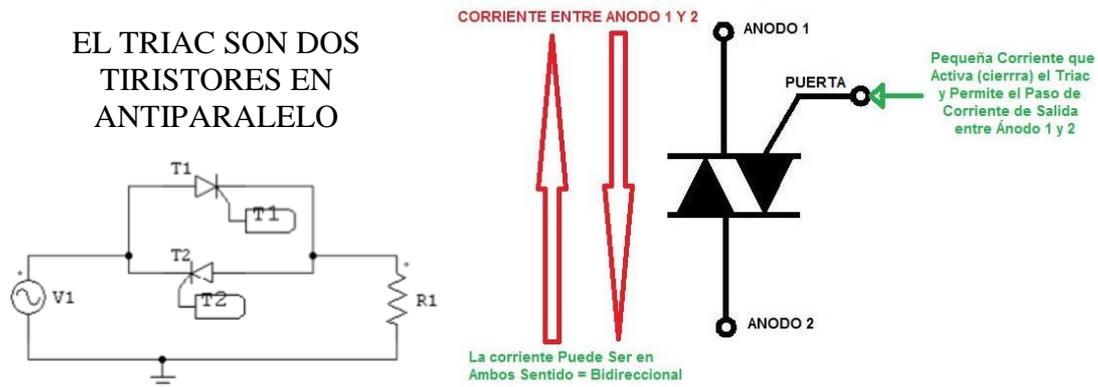


Fig. 4.2.30. Triac con tiristores (izquierda) y funcionamiento del triac (derecha)

Los reguladores de tensión funcionan de la siguiente manera, recortan la tensión de entrada de forma que disminuye el rendimiento de la onda, es decir, la tensión eficaz sobre la carga, como se puede ver en las gráficas.

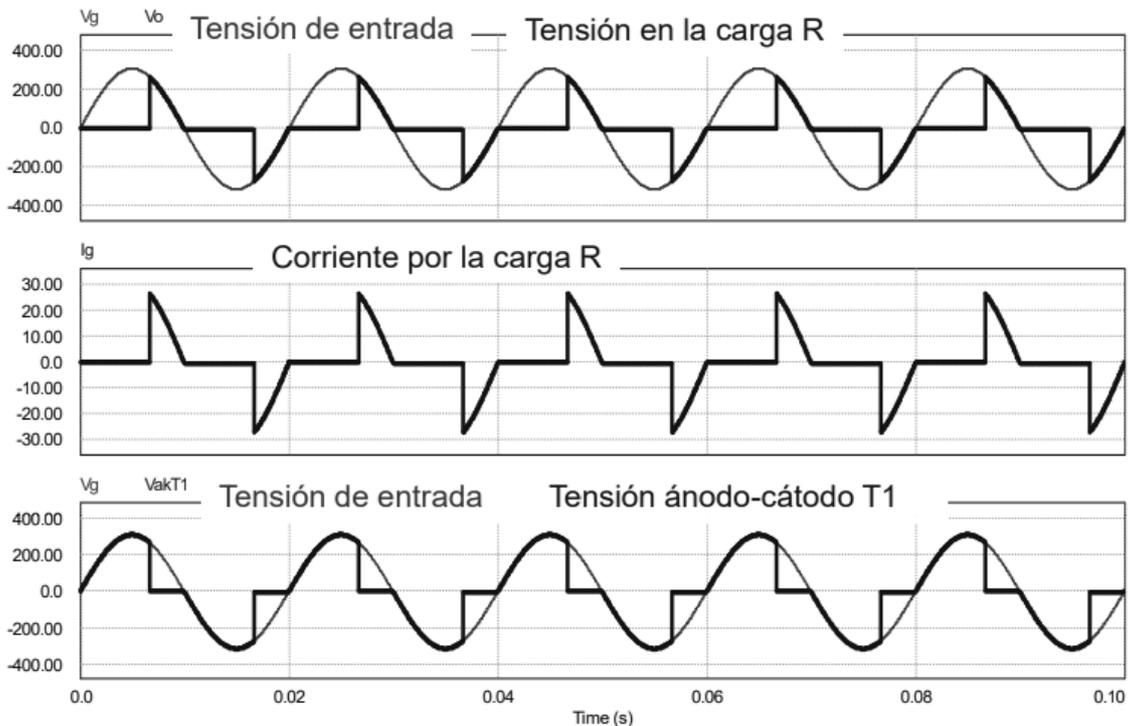
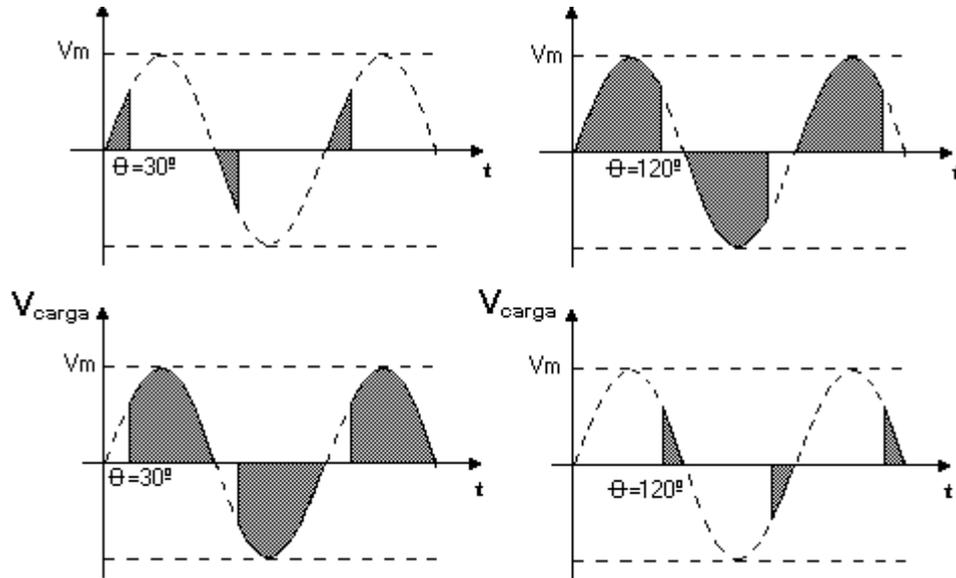


Fig. 4.2.31. Formas de onda ideales de los reguladores de tensión

De forma que el valor eficaz resultante y la forma de la onda a la salida, depende del retardo introducido al interruptor, que como se explicara más adelante, se trata de un simple circuito RC, donde al variar el tiempo de carga del condensador, se dispara antes o después el interruptor.



Donde el valor eficaz de la salida se define por la siguiente expresión.

$$V_{RMS\ out} = V_{RMS\ in} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left( \pi - \theta + \frac{\text{sen}(2 \cdot \theta)}{2} \right)} \quad [122]$$

Los cicloconvertidores en cambio, sirven para modificar la frecuencia de salida de la tensión, y lo logran separando la señal original en “trozos” más pequeños y juntándolos en otra señal de diferente frecuencia.

El circuito cicloconvertidor monofásico tiene la siguiente forma.

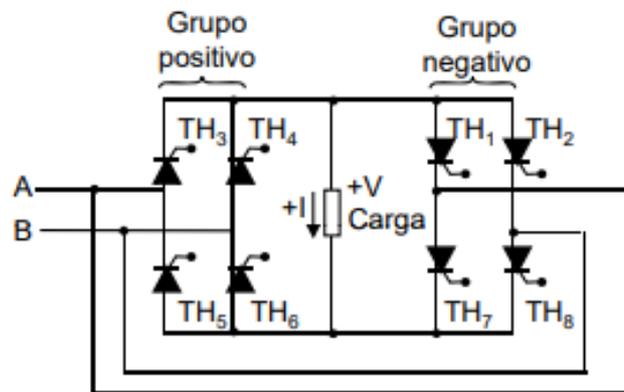


Fig. 4.2.32. Circuito esquemático de un cicloconvertidor

Como se puede apreciar en la siguiente gráfica de un cicloconvertidor de ángulo de disparo fijo, la señal de entrada senoidal, se recorta en trozos más pequeños, de forma que la frecuencia de la señal de salida sea diferente.

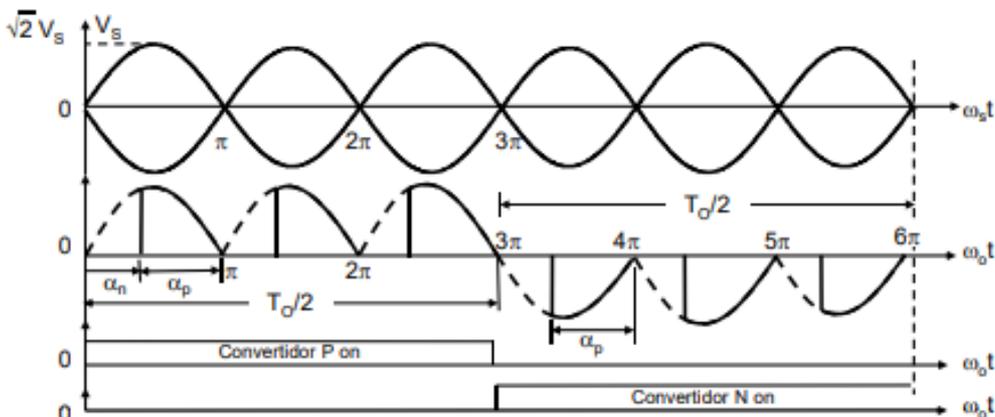


Fig. 4.2.33. Formas de onda del recorte producido por un cicloconvertidor

### 4.2.5. Transformadores

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados de corriente alterna arrollados sobre un núcleo magnético. El devanado por donde se introduce la energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale la energía hacia las cargas que se alimentan mediante el transformador se denomina secundario [21].

El funcionamiento del transformador se basa en la ley de inducción de Faraday, de manera que un circuito eléctrico influye sobre el otro a través del flujo generado en el circuito magnético.

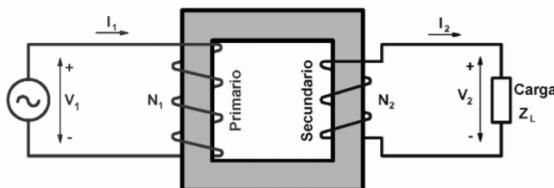


Fig. 4.2.34. Esquema de un transformador

El parámetro más importante de un transformador es su relación de transformación, que viene definida por la división entre las espiras del primario y secundario, de la siguiente forma.

$$n = \frac{N1}{N2} = \frac{\text{Num Espiras Primario}}{\text{Numero Espiras Secundario}} \quad [123]$$

Debido a que se pretende que sea máximo el flujo que proporcionando por un arrollamiento atraviese a los demás, el circuito magnético suele ser de baja reluctancia. La siguiente expresión sirve para calcular el flujo magnético que se está induciendo entre los devanados.

$$\Phi = \frac{N \cdot i}{\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu} \cdot \frac{1}{s}} \quad [124]$$

La reluctancia es la resistencia que opone un material al paso del flujo magnético por él. Por analogía se considera la fórmula anterior como la ley de Ohm aplicada a circuitos magnéticos.

El devanado de alta tensión es el de más espiras y el devanado de baja tensión es el de menos espiras, como consiguiente, el transformador puede ser, reductor, elevador o de suma cero, es decir, el número de espiras es el mismo, y solo sirve para aislar las dos redes eléctricas.

### 4.3. El sistema energético fotovoltaico

#### 4.3.1. Introducción

El sistema energético fotovoltaico se refiere, al esquema de bloques que representa los distintos dispositivos electrónicos que componen un sistema basado en la generación y almacenamiento de energía por distintos medios, para este caso, electricidad generada por medio de la radiación solar.

En los próximos puntos se explicarán los diferentes dispositivos que componen una red eléctrica completa basada en paneles solares, se pueden distinguir dos tipos de sistemas [22,23]:

- Para autoconsumo propio
- Para sistemas de autoconsumo bidireccionales o sistemas de generación eléctrica.

Los dispositivos comunes en ambos sistemas, son los paneles solares y el conjunto inversor-transformador.

El resto de componentes difieren dependiendo de la aplicación en la que vayan a ser instalados, en los siguientes puntos se explican las diferencias y utilidad.

#### *Sistema de generación solar para autoconsumo*

Este tipo de distribución está pensado para ser independiente de la red, es decir, el individuo solo puede consumir la energía que produce.

El conjunto está compuesto por:

- Paneles fotovoltaicos
- Controlador de carga y convertidor DC-DC (si fuera necesario)
- Sistema de almacenamiento de energía
- Grupo Inversor Transformador
- Panel de distribución AC

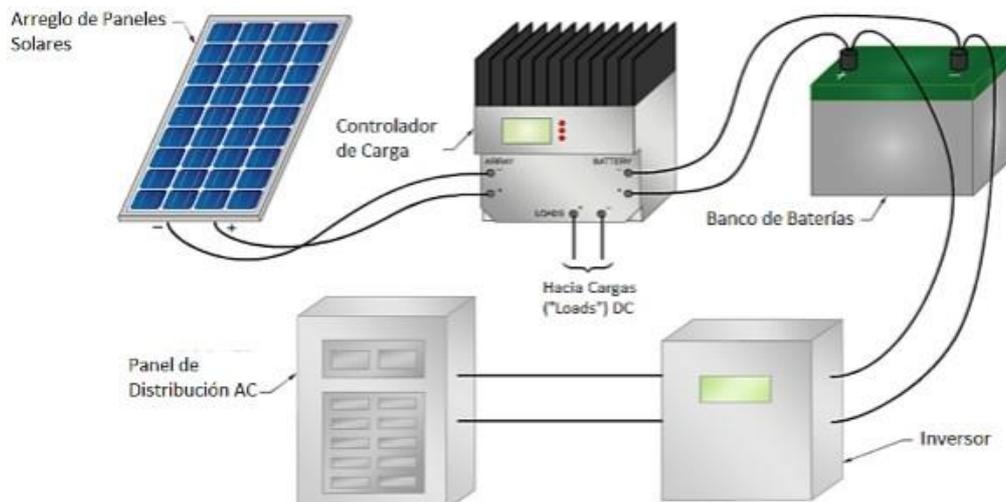


Fig. 4.3.1. Sistema solar para autoconsumo con acumulador monoblock

El prototipo del montaje práctico de este trabajo de fin de grado tiene este tipo de distribución como se puede ver en la siguiente imagen.

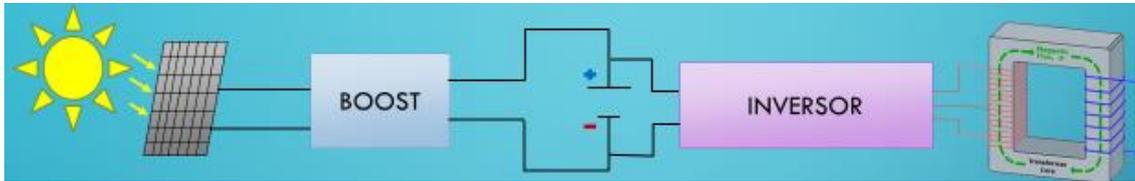


Fig. 4.3.2. Distribución por bloques del montaje de la maqueta

Esta maqueta se explicará de forma detallada más adelante.

### *Sistema de generación solar bidireccional*

Este tipo de distribución es la que sigue cualquier empresa dedicada a la producción energética por medio de la energía solar.

Es decir, la implementación de un sistema solar de este tipo en una vivienda, por poner un ejemplo, actuaría como una mini empresa de generación eléctrica a efectos de la red.

El contador bidireccional suma la energía que suministra a la red, y resta la energía que se utiliza de la red, la operación resultante, si es positiva se obtendría ingresos por la energía suministrada, y si en cambio, la operación resultante es negativa, se cobraría por la energía utilizada.

Una de las ventajas de esta distribución para la implementación en empresas, generalmente del entorno industrial, es que pueden accionar las máquinas eléctricas con energía de la red, en lugar de energía proveniente de las baterías, con el desgaste que esto conllevaría.

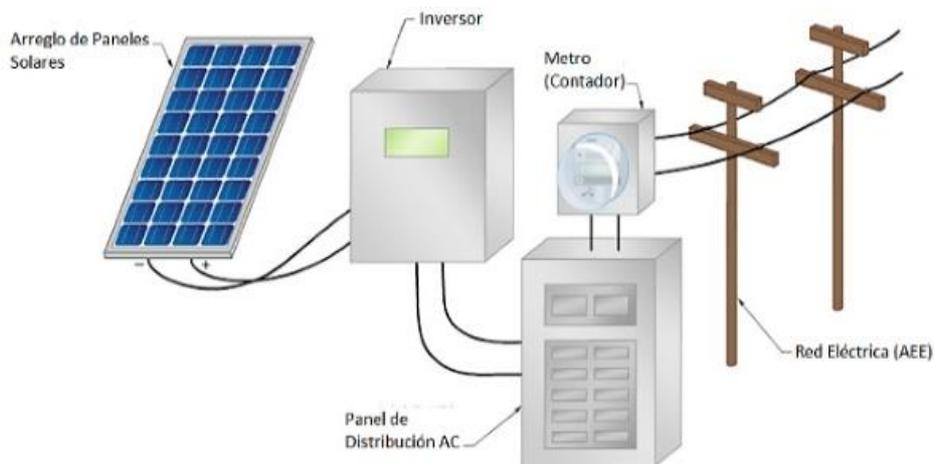


Fig. 4.3.3. Sistema de generación solar bidireccional

La principal ventaja de esta distribución es que la inversión inicial es menor que si se implementan baterías, no requiere mantenimiento, y además, en cualquiera de los casos supondría un ahorro en la factura de la luz.

Por no decir, que si se suministra más de la energía que se consume, además de no pagar por la luz, se estarían obteniendo beneficios económicos, a diferencia del sistema de autoconsumo propio, donde si las baterías están llenas, se estaría perdiendo la energía excedente.

### 4.3.2. Paneles fotovoltaicos

Cuando se piensa en realizar una instalación fotovoltaica, sin duda el elemento principal es el tipo de célula solar que se va a utilizar, ya que de esto dependerá la capacidad energética que se podrá obtener.

Además, dependiendo de la zona geográfica puede interesar un tipo de célula u otra, se pueden dividir los tipos de paneles o células solares en tres grupos principales [24].

- Paneles solares fotovoltaicos
- Paneles solares térmicos
- Paneles solares híbridos, térmicos y fotovoltaicos

#### Tipos y Distribuciones

##### Paneles solares fotovoltaicos

Este tipo de paneles solares transforman la energía lumínica del sol en energía eléctrica, el movimiento de los fotones, en el movimiento de electrones, como se ha explicado al comienzo de este punto.

Los paneles fotovoltaicos se basan en celdas de silicio, tienen aproximadamente una vida útil de 30 años, prácticamente sin mantenimiento.

Dentro de este grupo de paneles solares fotovoltaicos, se pueden encontrar dos grupos bien diferenciados, los que están fabricados con celdas monocristalinas y los que están fabricados con celdas policristalinas.



Fig. 4.3.4. Panel solar monocristalino (izquierda) panel solar policristalino (derecha)

La diferencia entre ambos es mínima, la mayor es que en condiciones estándar, los paneles de celdas monocristalinas tienen una mayor eficiencia energética, aunque esto solo es relevante si el espacio disponible es limitado, por el contrario, por el precio de las celdas monocristalinas se pueden emplear más celdas policristalinas, por lo que se aumentaría la cantidad energética disponible.

Además, las celdas policristalinas se ven afectadas positivamente si la temperatura es elevada, por lo que pueden llegar a igualar, o incluso superar a las celdas monocristalinas si las temperaturas del entorno alcanzan temperaturas elevadas.

##### Paneles solares térmicos

Este tipo de paneles permiten transformar la energía térmica del sol en energía térmica, uno de los usos más interesantes y adaptados, por poner un ejemplo, es el empleo de este tipo de paneles térmicos para la climatización de piscinas.

Generalmente funcionan como un circuito cerrado de calefacción, que se calienta en el tejado, y que, mediante una bomba de agua, se utiliza para calentar otras zonas más frías.



*Fig. 4.3.5. Panel solar térmico*

Se pueden englobar en tres grupos principales:

- Colector de baja temperatura, alcanzan un máximo de 50°C, y se emplean principalmente para calefacción.
- Colector de media temperatura, son similares a los anteriores, la diferencia más notable es que incluye una cubierta transparente de plástico que actúa a modo de invernadero, y evita que se escape el calor generado. Pueden llegar a alcanzar los 90°C.
- Colector de alta temperatura, pueden llegar a alcanzar los 150°C, este tipo de paneles térmicos se emplean para la generación de vapor y posterior movimiento de una turbina generadora de electricidad.

#### Paneles solares híbridos

Este último panel combina las ventajas de ambos mundos, generan energía eléctrica por medio de la luz, y calor mediante la radiación solar.

La evolución de estos paneles en los últimos años ha sido muy positiva, ya que, al tener ambas ventajas, son ideales para el área doméstica.

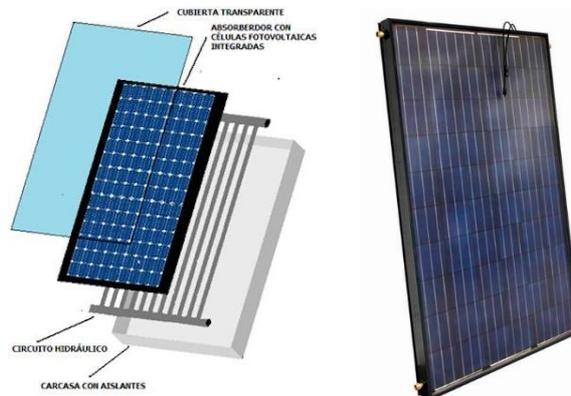


Fig. 4.3.6. Paneles solares híbridos

Como se puede ver, se trata de un circuito hidráulico superpuesto con un panel solar y una cubierta transparente para atrapar el calor.

#### Selección del adecuado

Para seleccionar el panel más conveniente para cada tipo de uso es importante saber que función van a desempeñar.

Si se puede aprovechar el calor del sol para alguna función concreta, como por ejemplo la climatización de piscinas, o la calefacción del hogar, un panel térmico es perfecto.

Si el único requisito es la obtención de energía eléctrica solo sería necesario del primer tipo, en cuyo caso se debería decidir si se quiere monocristalino o policristalino.

Lo ideal sería más paneles policristalinos por el mismo precio que menos monocristalinos, ya que así se conseguiría generar mayor cantidad de energía, solo se debería seleccionar monocristalino si el espacio es reducido.

Por último, si se pueden utilizar para desempeñar ambas funciones se debería considerar el empleo de paneles híbridos, ya que así se aprovecharían las ventajas de ambos. Aunque habría que considerar el aumento en el costo de la inversión.

#### 4.3.3. Reguladores de carga

Los reguladores de carga, regulan y controlan el nivel de energía almacenado por las baterías, de esta forma, se evitan sobre-cargas y sobre-descargas [25].

Si esto llegara a ocurrir, podría ser fatal para las baterías porque las baterías no están preparadas para estar fuera de sus límites de funcionamiento, y genera un estrés muy grande. Como se puede ver en la curva de descarga de una celda de 2 V nominales.

Todos los reguladores de carga son dispositivos completamente autónomos, realizan las mediciones y correcciones de carga automáticamente.

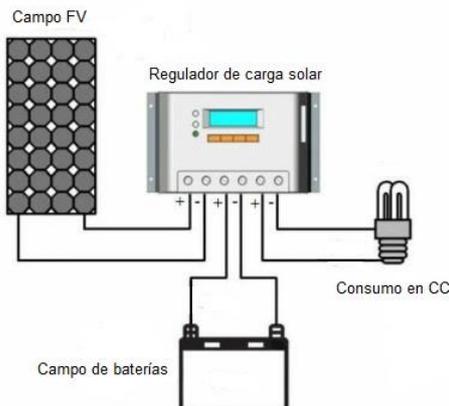


Fig. 4.3.7. Esquema de un regulador de carga

El regulador gestiona la carga de las baterías al 100% de su capacidad en 3 pasos (absorción-equalización-flotación) desde los paneles solares. La función principal del regulador de carga es proteger la batería de su sistema fotovoltaico contra los riesgos de sobrecarga y descarga profunda.

Un controlador solar también proporciona funciones de control de temperatura y corriente inversa, por lo que el controlador siempre debe instalarse junto a las baterías.

Finalmente, ha surgido una nueva generación de reguladores de alta eficiencia: reguladores solares MPPT (para el seguimiento del punto de máxima potencia). Esta nueva tecnología permite obtener el mejor rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos: de un 15% a un 30% más de energía.

### Tipos y Distribuciones

Se pueden distinguir dos tipos de reguladores de carga.

- Reguladores PWM.
- Reguladores MPPT

#### Reguladores PWM

Los reguladores basados en PWM, son los convertidores DC-DC a los que se ha referido el punto convertidores DC-DC del apartado Historia del arte. Más detalles en ese punto.



Fig. 4.3.8. Regulador de carga PWM

#### Reguladores MPPT

Este tipo de reguladores, son la última innovación en sistemas de paneles solares, y logran mejorar el rendimiento de los paneles solares a igualdad de condiciones en hasta un 25%.



Fig. 4.3.9. Regulador de carga MPPT

Se trata de reguladores de carga que trabajan constantemente en el punto de potencia máximo de los paneles solares, de forma que se obtiene mejor desempeño que con los PWM, que no dejan de ser convertidores DC-DC normales programados para cargar baterías.

#### Selección del adecuado

Estos reguladores no solo aumentan la producción de energía de un sistema fotovoltaico, sino que, al optimizar la carga de las baterías, también aumentan significativamente su vida útil.

Para elegir su regulador de carga, es necesario tener en cuenta 2 elementos principales:

- La tensión entre los paneles y las baterías: el regulador debe poder aceptar esta tensión que en general es de 12 V, 24 V o 48 V.
- La corriente máxima del controlador: es decir, para ejecutar la función de regulador de intensidad, la intensidad soportada por el regulador, debe ser mayor que la intensidad de los paneles solares a los que está conectado.

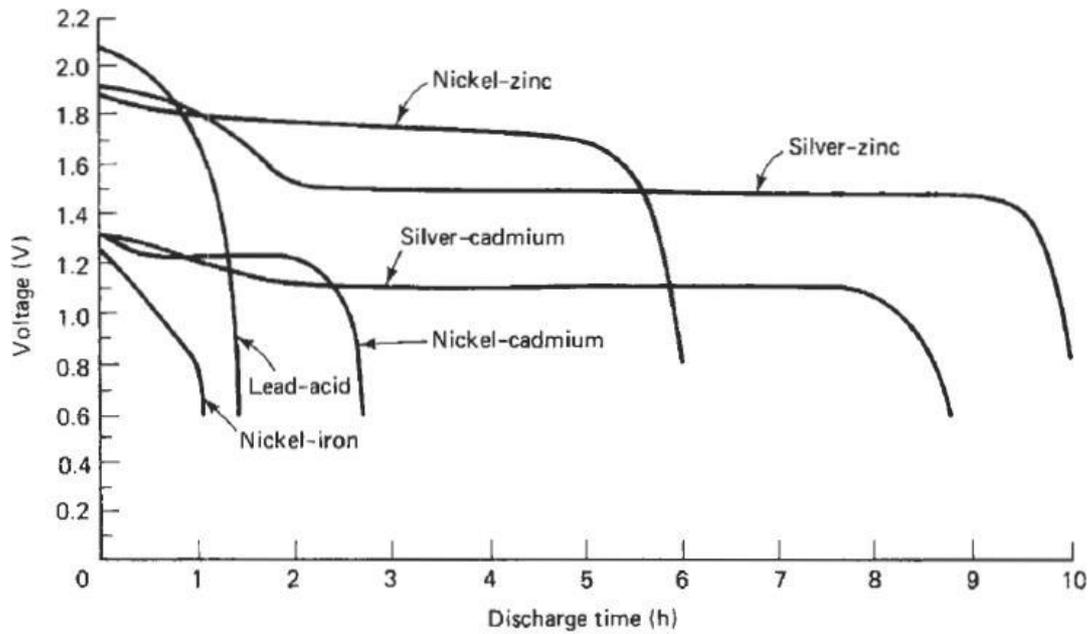
Siempre y cuando sea posible hay que apostar por un regulador MPPT, salvo que la diferencia económica suponga un aumento considerable en el precio de la instalación (como ha sido el caso en el montaje práctico de este proyecto), aunque sin duda, se recuperará en eficiencia energética.

#### 4.3.4. Sistemas de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía son un quebradero de cabeza actualmente ya que aún no se ha desarrollado un sistema capaz de almacenar grandes cantidades de energía a bajo coste y en poco espacio.

Aunque si existen distintos tipos de sistemas de almacenamiento que generalmente se emplean en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos [26].

En la siguiente figura Fig. 4.3.10. se pueden ver las curvas de descarga de diferentes tipos de tecnologías químicas en baterías, entre ellas se puede ver que las curvas de descarga para las de plomo son las más pronunciadas esto se debe a que la gráfica compara las baterías por peso en descarga sobre las mismas condiciones, como las de plomo están entre las baterías de menor capacidad por kg, la descarga es más pronunciada, aunque una entre las ventajas de las baterías de plomo es que soportan más ciclos de carga y descarga durante su vida útil que el resto de tecnologías.



Typical discharge characteristics of various secondary battery systems of equal weight discharging under the same conditions

Fig. 4.3.10. Curvas de descarga de distintas tecnologías de baterías

Se van a comparar las curvas de descarga de las baterías de plomo ácido, en las que se basan gran parte de las baterías estacionarias con las curvas de descarga de las baterías Li-ion que es la nueva tecnología que se está empezando a utilizar en gran parte de aplicaciones que requieren de acumuladores de energía.

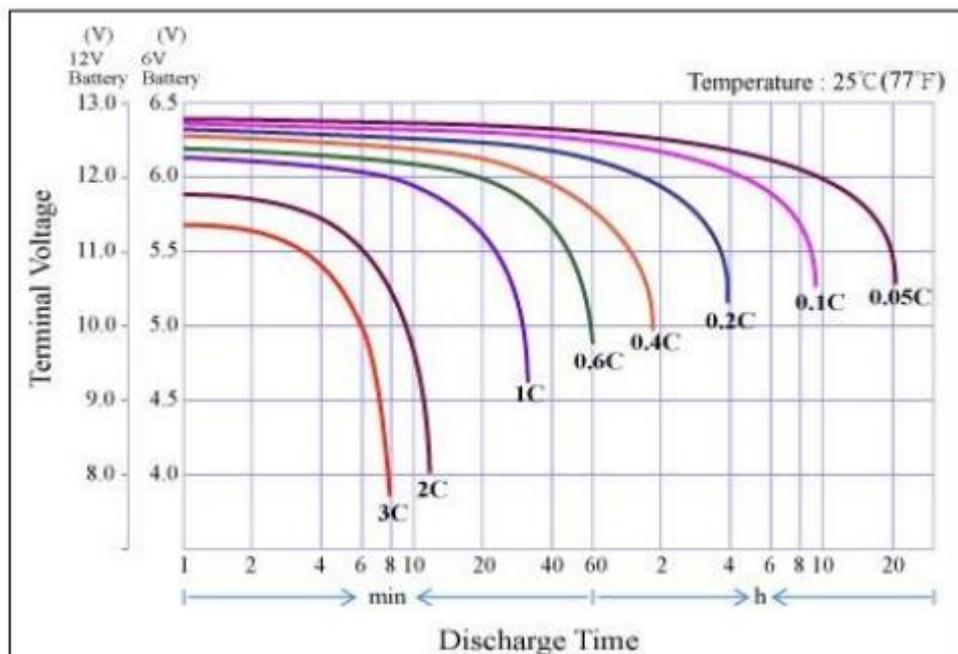


Fig. 4.3.11. Curva de descarga de baterías de tecnología de Plomo Ácido

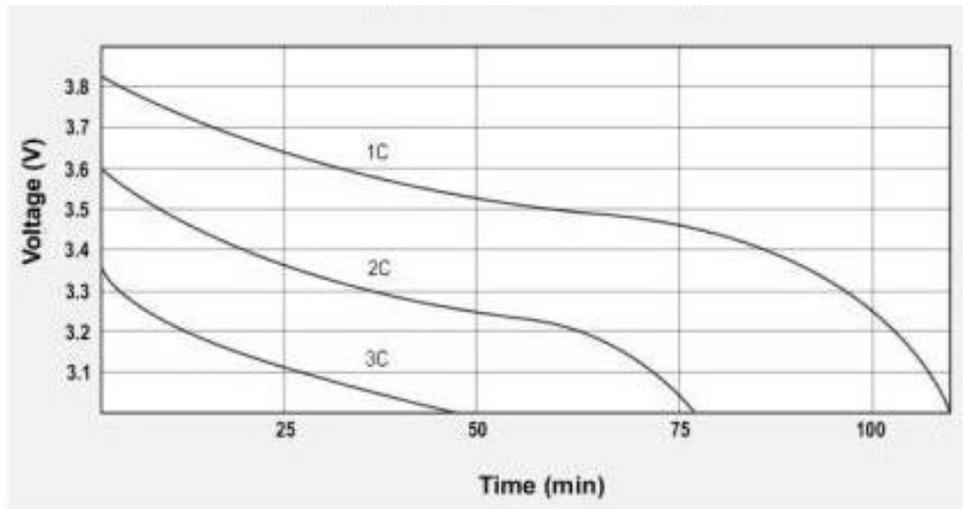


Fig. 4.3.12. Curvas de descarga de baterías de tecnología Li-Ion

Las letras "C" que aparecen en las gráficas son la capacidad de la batería en mAh, es decir, 2C quiere decir que la tasa de descarga es en Amperios, el doble de la capacidad de la batería, por poner un ejemplo, si una batería de 1000mAh se descarga a 2C se están consumiendo 2 Amperios de la batería.

Al realizar una comparativa entre ambas tecnologías con las tasas de descarga 1C, 2C y 3C, lo primero que llama la atención es que las curvas de descarga de ambas tecnologías tienden a 0 V cuando se gasta la energía que almacenan. Esto se debe a que llega un punto en el que la batería no puede dar la corriente que se pide y por esta razón disminuye su tensión tendiendo a 0 V en picado. Si se seguiría consumiendo de la batería el daño sería irreparable. Las baterías de plomo tienden a mantener la tensión más constante al comienzo, pero su duración es menor que las baterías de Li-Ion que consiguen mantener la tensión en un mismo nivel de voltaje con la misma tasa de descarga durante más tiempo.

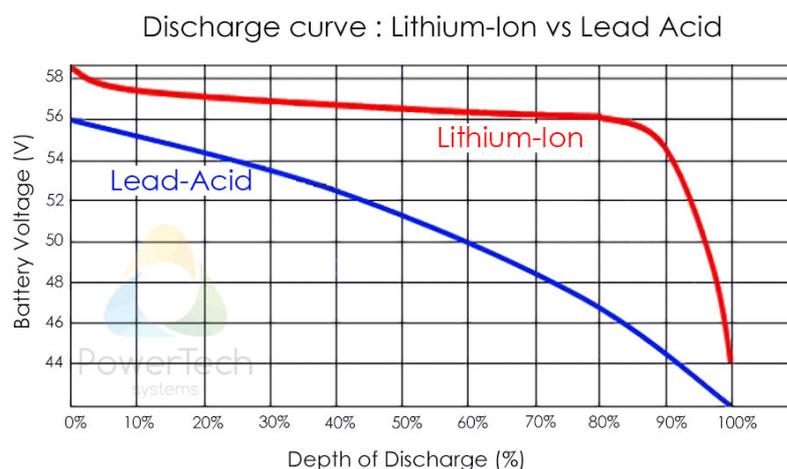


Fig. 4.3.13. Curva de descarga Li-Ion vs Plomo Ácido

Es importante destacar que el uso de baterías solo se da si se necesita autoconsumo, ya que una empresa generadora de energía solar vende la energía a la red eléctrica al momento.

Debido a que no es posible generar energía solar las 24h del día a causa de las condiciones físicas de la tierra, si se quiere autoconsumo es necesario almacenar energía durante el día.

### Tipos y Distribuciones

Por lo general se emplean dos tipos de acumuladores solares:

- Acumuladores Monoblock
  - Baterías de Gel
  - Baterías AGM
  - Baterías Litio y Litio-Ion
- Acumuladores Estacionarios

#### Acumuladores monoblock

Generalmente se emplea en instalaciones para autoconsumo de baja y media potencia, pueden cubrir el consumo en iluminación, televisión, electrodomésticos de baja potencia y similares.

Tienen unos ciclos de carga y descarga inferiores a los acumuladores estacionarios, y su vida útil ronda de 7 a 10 años.



*Fig. 4.3.14. Acumulador Monoblock*

Los acumuladores monoblock tienen tensiones entre 6 V y 12 V. Este tipo de baterías son perfectas para el autoconsumo a pequeña escala porque son las más económicas, además, ocupan menos espacio que las baterías estacionarias, por lo que se pueden instalar como si de una caldera o calentador se tratasen.

Por un lado, se pueden diferenciar dos grupos de acumuladores monoblock principales; baterías de gel y baterías AGM, su mantenimiento es escaso, y tienen ciclos carga-descarga que soporta los arranques de electrodomésticos de baja potencia, aunque no son tan potentes como las baterías estacionarias.

Por otro lado, baterías de litio o de ion-litio, son relativamente nuevas en aplicaciones solares, y también pertenecen a este tipo de baterías monoblock, tienen una descarga muy estable y profunda, y actualmente, gracias a los últimos avances en esta tecnología, se consideran las baterías para autoconsumo del futuro.

#### Acumuladores estacionarios

Se emplean en instalaciones solares de medio a alto consumo, sus principales ventajas son, que aceptan ciclos de carga-descarga más profundos y rápidos, y que, además, tienen una vida útil de casi 20 años, pero evidentemente tienen un mayor coste económico.

Debido a que estas baterías se componen de numerosas células de 2V, generalmente bastante grandes y pesados, necesitan de un lugar específico para su instalación, a diferencia de las monoblock que pueden instalarse casi en cualquier lugar.



Fig. 4.3.15. Acumuladores estacionarios

Modelos estacionarios podrían ser:

- Tipo OPZS, son las más empleadas en grandes instalaciones fotovoltaicas y poseen gran resistencia para ciclos continuos de carga-descarga y una gran capacidad de almacenaje, su vida útil ronda los 20 años. Su desventaja principal es que necesitan mantenimiento cada 2 años.
- Tipo OPZV, tienen las ventajas de las baterías OPZS, pero no requiere de mantenimiento cada 2 años, aunque su vida útil generalmente es inferior a los 20 años.
- Tipo TOPZS, son parecidas a las baterías OPZS pero más económicas y de menor calidad (que se traduce en menor vida útil), esto se debe a que su proceso de fabricación se ha simplificado y que tienen un envase translúcido más barato.

#### Selección del adecuado

Una vez conocidos los tipos de acumuladores y para que se emplean, se va a ver como seleccionar el más adecuado para la aplicación de autoconsumo que se necesite.

En primer lugar, si se dispone de espacio para su instalación, siempre sería lo más recomendable, sin importar la aplicación de autoconsumo, seleccionar acumuladores del tipo estacionarios OPZS (si se conoce como realizar el mantenimiento cada 2 años), o OPZV (si no se quiere realizar el mantenimiento).

La razón de esta recomendación es que a la larga siempre salen más rentables, además de sus ventajas a nivel eléctrico de carga y descarga, realizar una mayor inversión inicial para una mayor rentabilidad a la larga es generalmente la mejor decisión.

Si no se quiere o no se puede instalar acumuladores estacionarios por cualquier motivo, la recomendación sin duda sería seleccionar acumuladores monoblock con tecnología Litio o Ion-Litio, ya que los últimos avances tecnológicos han dado resultados y actualmente son los mejores tipos de baterías monoblock.

La principal desventaja de estos sistemas monoblock de tecnología Litio o Litio-Ion, son que la vida útil es mucho más reducida, en torno a los 5 años, además, de que a nivel de costes no suponen tanto ahorro frente a baterías estacionarias.

#### 4.3.5. Sistemas de Inversión y Distribución de energía

Se entiende por inversión a la conversión de energía continua en energía alterna, que se explicaran los distintos tipos en este apartado.

Se pueden dividir los intereses de los individuos que emplean instalaciones de paneles solares principalmente en dos grupos.

- Para producción de electricidad
- Para autoabastecimiento

##### Sistemas de inversión y distribución de energía para generación

En este grupo se incluyen los sistemas de inversión de energía para generación, es decir, empresas dedicadas a la generación de energía eléctrica limpia con paneles solares fotovoltaicos.

Estas empresas, disponen de grandes instalaciones de paneles solares tanto en serie como en paralelo, por lo que la potencia generada, es muy grande. Para invertir y manejar estas potencias, independientemente de su distribución, disponen de todos los componentes del sistema energético solar para generación explicado al comienzo de este punto, y utilizan inversión trifásica y transformación de alta tensión, para conectarse y vender energía a la red eléctrica general.

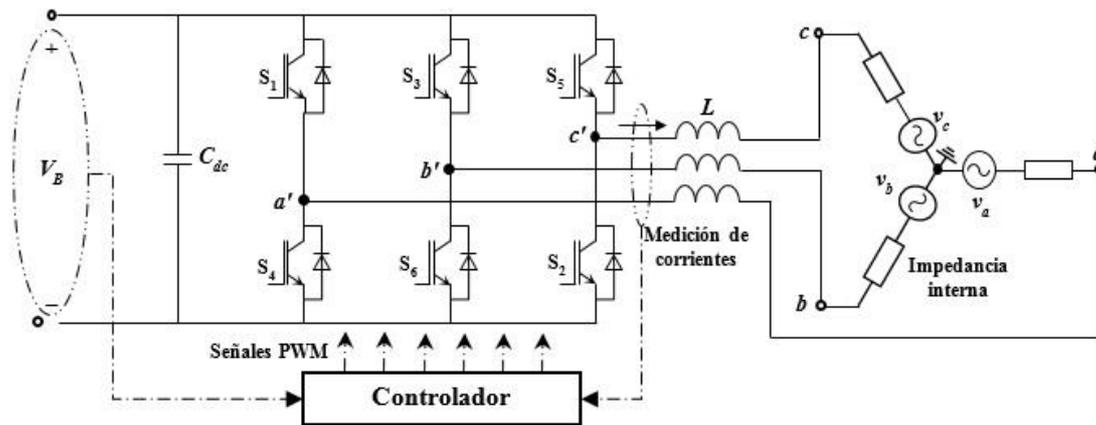


Fig. 4.3.16. Inversor trifásico PWM

El concepto más importante en los inversores trifásicos es el tipo de modulación que se utiliza ya que el empleo de uno u otro tiene diferentes ventajas o inconvenientes que hay que priorizar para elegir el más adecuado.

Los dos tipos más empleados son modulación PWM y modulación Six-Step.

$$PWM \rightarrow V_{ab\text{salida}} \cdot \text{sen}(wt) = \sqrt{3} \cdot m_a \cdot \frac{V_{\text{entrada}}}{2} \quad [125]$$

$$SixStep \rightarrow V_{ab\text{salida}} \cdot \text{sen}(wt) = \sqrt{3} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_{\text{entrada}}}{2} \quad [126]$$

## Sistemas de inversión y distribución de energía para autoconsumo particular e industrial

En este grupo se incluyen todos los sistemas que se emplean para autoabastecimiento. Las instalaciones de autoabastecimiento, generalmente se emplean redes monofásicas de 220 V ya que es la misma tensión que ofrece la red.

Se utilizan generalmente redes fotovoltaicas de 48 V, aunque las hay de menor tensión 24 V o incluso más pequeñas, de 12 V. El tipo de inversores que se deberían emplear, son inversores monofásicos de salida senoidal pura, esto quiere decir que a la salida se obtiene una señal senoidal, parece obvio pero gran parte de los inversores monofásicos del mercado no son completamente de senoidal pura.

Se comenta el tema de la señal senoidal pura ya que generalmente, la calidad de la red eléctrica mediante un sistema de conversión solar es mucho mayor que la que se puede obtener en la red eléctrica general.

Este tipo de instalaciones son mucho más simples que las instalaciones trifásicas, generalmente presentes en los sistemas de generación de energía.

El típico circuito de un inversor monofásico está compuesto por cuatro transistores que conmutan por parejas desfasados 180º, y entregan a la salida la tensión media entre bornes de la fuente, con polaridades inversas.

$$\text{Valor máximo del primer armónico: } V_{m\acute{a}x} = \frac{4U_{dc}}{\pi} \quad [127]$$

$$\text{Valor eficaz del primer armónico: } V_{eficaz} = \frac{4U_{dc}}{\sqrt{2}\pi} \quad [128]$$

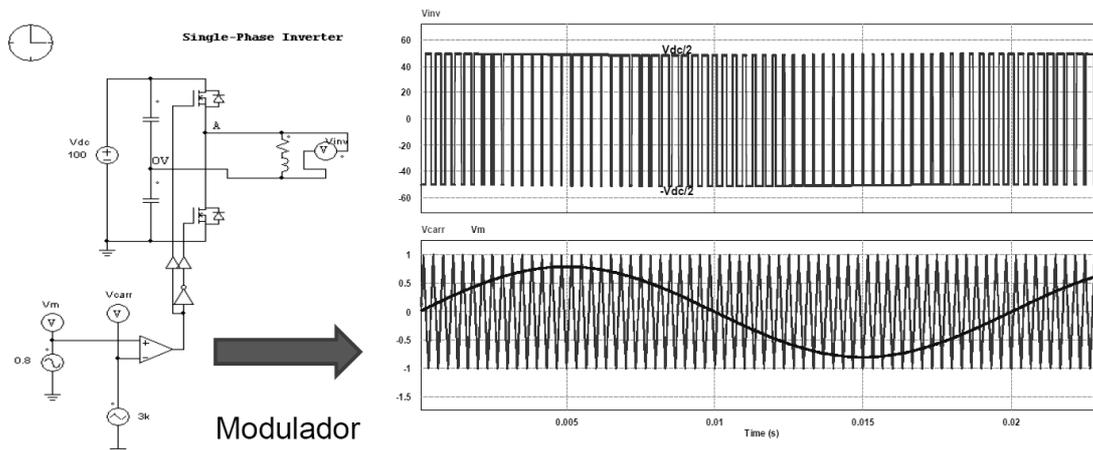


Fig. 4.3.17. Inversor monofásico con modulación PWM

## 5. Análisis y resultados

### 5.1. Introducción

En este apartado, se conocerá en detalle todos los parámetros de diseño y selección de componentes acerca del prototipo de “Mini-Convertidores”.

El principal objetivo de este proyecto es manejar la electricidad en todos los sentidos (-AC-DC-DC-AC-) mediante convertidores eléctricos, y además, generar energía eléctrica utilizando como fuente la energía solar. Para ello se va a hacer uso de diferentes convertidores eléctricos para manejar la energía como se desee.

A través de un panel solar, se va a convertir la energía solar en energía eléctrica, si se desea más información acerca de este proceso de transformación energética en estado del arte. Después, con un circuito elevador de tensión “boost” se va a elevar la tensión obtenida por el panel solar para cargar una batería de 12V de tensión nominal. Desde esta batería se garantizará energía suficiente para el correcto funcionamiento del prototipo incluso cuando la energía solar sea escasa o directamente no haya luz solar. A la salida de la batería irá conectado un inversor para transformar de corriente continua de la batería en alterna de baja tensión, por lo que se conectará a dos transformadores en paralelo para obtener un transformador simétrico con toma intermedia y así elevar la tensión a 230V AC útiles, como los que tiene el enchufe de casa. Por último, se tendrá la opción de conectar dos prototipos a esa salida de 230V:

- Un regulador AC para regular la energía alterna para controlar consumo, regular la velocidad de un motor, la temperatura de un radiador...
- Una fuente de alimentación típica de laboratorio de 30 V y Max 3,5 A para así poder alimentar los circuitos electrónicos que se quieran desarrollar y al valor de tensión continua que se desee.

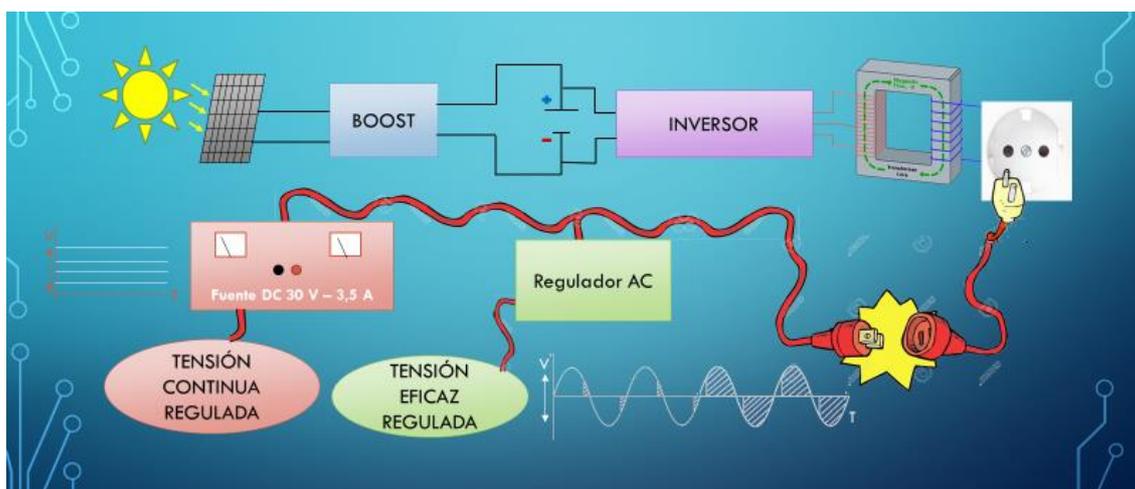


Fig. 5.1.1. Diagrama de bloques de la conexión entre los prototipos de convertidores

### 5.2. Análisis de riesgos

En este apartado se va a comentar brevemente acerca del riesgo eléctrico asociado a este prototipo, ya que se van a manejar tensiones elevadas de 230V y el inversor en vacío se llegan

hasta los 400V, y eso es muy peligroso. Por ello, se han implementado algunas medidas de seguridad, sobre todo en la parte de tensiones alternas elevadas de 230V.

En la salida de los transformadores se ha conectado un Neón Rojo de manera que si hay alta tensión a la salida (sin importar si es 120V, 230V o en vacío hasta 400V) se notifique al usuario que hay alta tensión lumínicamente, así simplemente hay que mirar si el Neón está encendido, ya que podría darse el caso de que se pretenda cambiar la carga con el sistema encendido y sería muy peligroso.

En el caso de que llegase a ocurrir un cortocircuito, se han colocado 2 Fusibles, uno de 200mA a la salida de los transformadores, junto al Neón, y otro de 1A a la entrada del Boost, ya que en vacío es capaz de elevar la tensión hasta los 60V de CC.

El regulador de alterna cuenta con otro fusible a la entrada por si ocurriese algún cortocircuito, aunque es de 10A ya que es capaz de regular hasta 16A o 3,6kW, si se pretende poner una carga tan grande hay que cambiar el fusible por uno mayor. Y al mismo tiempo se ha intentado aislar al máximo posible empleando una caja de plástico de helado y silicona, aunque este aislamiento es suficiente para esta aplicación, es muy poco probable que pasase cualquier normativa de seguridad oficial de las que pasan este tipo de dispositivos antes de su comercialización.

Respecto a la fuente de alimentación de laboratorio, cuenta con dos fusibles, uno de 0.5 A, a la entrada antes del rectificado y otro de 5 A en serie con el conector de tipo "banana" en el polo negativo de salida.

### 5.3. Paneles solares y tensión del sistema

Para comenzar, se han decidido dos parámetros, la tensión de funcionamiento del sistema, donde la selección es 12 V, ideal para un sistema de estas características; y la tensión del acumulador del tipo monoblock de plomo, de tensión nominal también de 12 V.

Se ha empleado un panel solar de 12 V y 1,5 W para el prototipo, aunque se podrían conectar más en paralelo para obtener más corriente y por lo tanto más potencia.



*Fig. 5.3.1. Panel solar empleado en la maqueta*

Una vez conocidos estos parámetros se desarrolla el DC-DC, y teniendo en cuenta que la tensión del panel solar y la de la batería son iguales, ¿para qué se necesita un elevador de tensión?

La respuesta, es que la tensión del panel solar es de 12 V pero solamente cuando el panel solar está bien iluminado, y la tensión de la batería a plena carga es de 14 V, por lo que el panel solar nunca sería capaz de cargar la batería completamente.

Por ello se desarrolló un boost, un elevador de tensión que independientemente de la entrada, desarrollaba más de 14 V, 14.2 V exactamente a la salida. De forma que la batería se podría cargar hasta su nivel máximo aun cuando el panel solar no estuviera funcionando a máxima potencia.

#### 5.4. Diseño y montaje del Elevador de Tensión

Para el diseño del elevador de tensión, se han pensado tres diseños, y se ha empleado el tercero, basado en un PWM con Arduino, por la sencillez la programación.

- Elevador de tensión con PWM basado en el Timer 555:
- Elevador de tensión basado en LM2577 (o similar)
- Elevador de tensión basado en PWM con Arduino:

##### 5.4.1. Elevador de tensión con PWM basado en el Timer 555

Esta configuración emplea un temporizador muy conocido, el timer NE 555 para generar una señal PWM y aplicará esa señal en la puerta MOSFET.

La frecuencia para este tipo de diseño se controla mediante el condensador conectado en el Pin 5 que controla la frecuencia de conmutación del PWM.

El duty-cycle se controla mediante un diseño típico basado en el disparo por tensión del Pin 6 empleando un circuito serie RC, en este caso la R (el Potenciómetro P1) es variable, de forma que se pueden variar la velocidad con la que se carga el condensador y como consecuencia la velocidad que tarda en llegar al valor de referencia de tensión donde se produce el disparo del Pin 6.

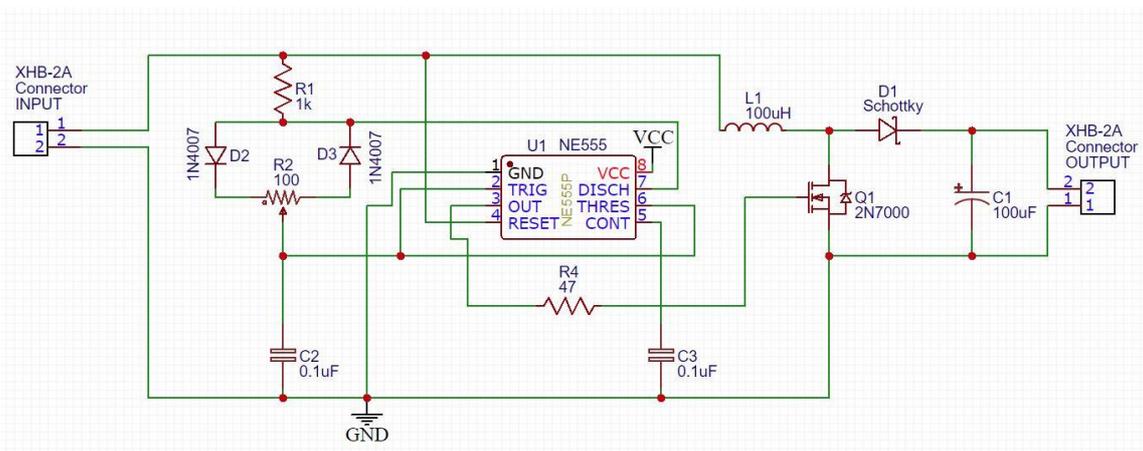


Fig. 5.4.1. Elevador de tensión controlado por timer 555

La desventaja principal de este diseño es que la salida cambiará si se cambia la carga de la salida ya que no tiene realimentación.

##### 5.4.2. Elevador de tensión basado en LM2577 (o similar)

La principal ventaja de este circuito integrado es que simplifica enormemente todo el montaje y diseño ya que se trata de un componente diseñado específicamente para hacer de elevador de tensión con feedback.

Este componente, tiene realimentación y por lo tanto la salida se mantiene igual con diferentes cargas, únicamente se necesitaría un condensador para tener una entrada estable.

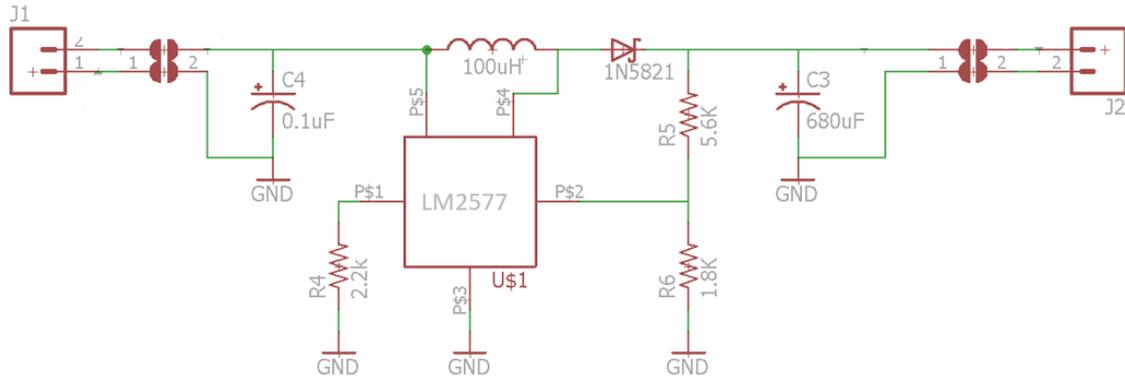


Fig. 5.4.2. Elevador de tensión con feedback controlado por LM2577

### 5.4.3. Elevador de tensión basado en PWM con Arduino:

Este último tipo es el que se ha desarrollado para el diseño del prototipo, ya que el empleo de un CI específico como el LM2477 no tendría ningún tipo de dificultad. Aunque con Arduino realmente no es un circuito con utilidad ya que el Arduino tiene un regulador de tensión de 5 voltios que reduce la eficiencia del circuito. Además, que el precio de montar un Arduino para este tipo de montaje tiene un coste mucho mayor que el de un CI específico para esta función.

Para este circuito se ha empleado un Arduino Uno para generar la señal PWM para conmutar el Transistor.

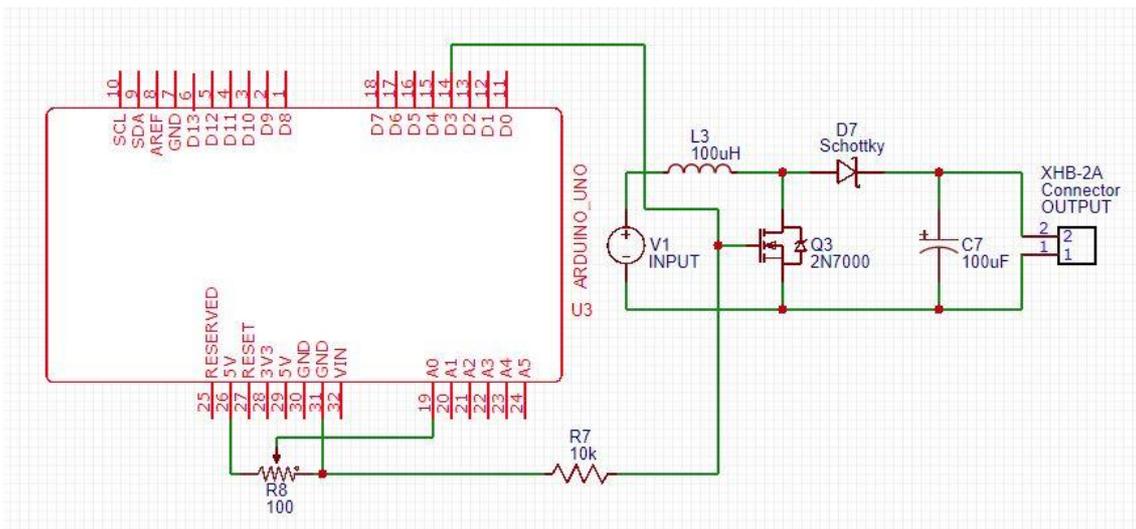


Fig. 5.4.3. Elevador de tensión con PWM en Arduino

Tal y como se puede ver, se tiene un potenciómetro conectado a una entrada analógica. Con el potenciómetro se elegirá el valor de salida entre 1 y 50 voltios aproximadamente. Esto se logra mediante R8 que regulará el valor de PWM que se entregue al transistor Q3 mediante el pin D3 de Arduino. El pin D3 concretamente, porque es una de las salidas digitales que permiten modulación por ancho de pulso.

La resistencia R7 es una resistencia “pulldown” simplemente para disminuir el voltaje y hacer que la referencia del PWM sea GND, la misma que la del potenciómetro de regulación.

Q3 es un Mosfet de la familia IRF, específicamente el IRF Z44N.

Es importante que D7 permita conmutación de altas frecuencias. Se podría haber colocado un diodo normal 1N 4007 en su lugar, pero se ha optado por un diodo Schottky porque son mejores para este tipo de aplicaciones debido a su altísima capacidad de frecuencia de conmutación.

El código programado en Arduino para la conmutación del PWM y el control del duty-cycle, se puede encontrar en el punto Software Arduino más adelante.

Se emplearon las siguientes ecuaciones para asegurar el funcionamiento en modo de conducción continua de la bobina y el dimensionamiento del resto de componentes del sistema. Cualquier duda acerca de la nomenclatura se puede consultar al comienzo del documento en el punto nomenclatura y cualquier duda acerca del desarrollo y origen las próximas ecuaciones, en el punto estado del arte convertidores DC-DC.

$$V_{salida} = \frac{V_{entrada}}{1 - D} \quad [129]$$

Potencia en la carga.

$$P_{carga} = \frac{V_o^2}{R} \quad [130]$$

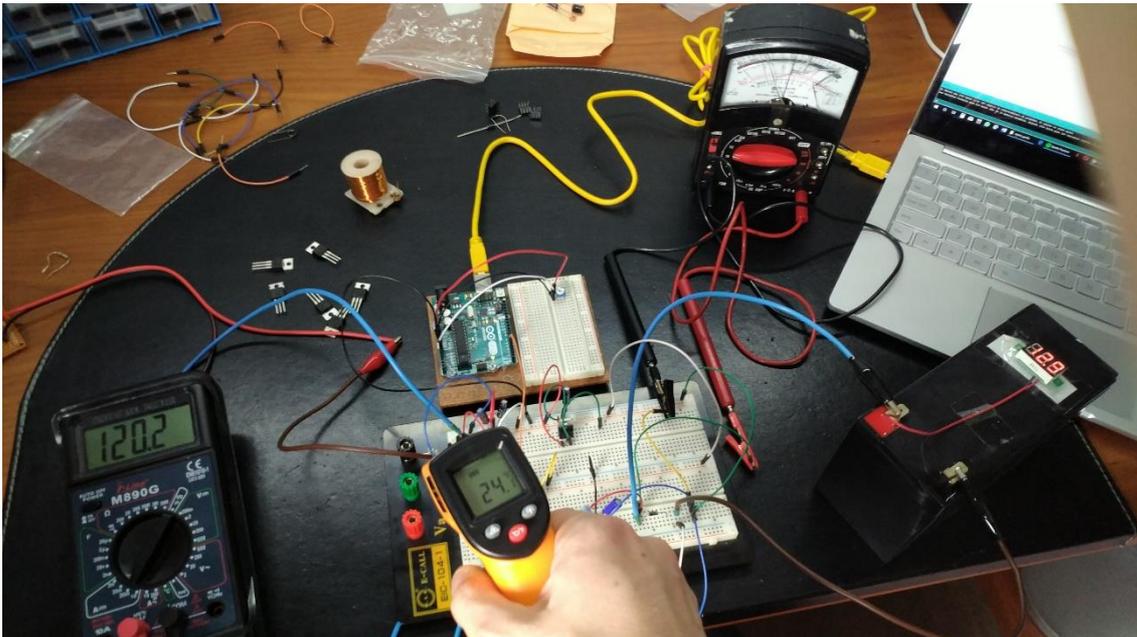
Rizado de la tensión de salida.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R \cdot C \cdot f} \quad [131]$$

Inductancia mínima para asegurar el modo de conducción continua.

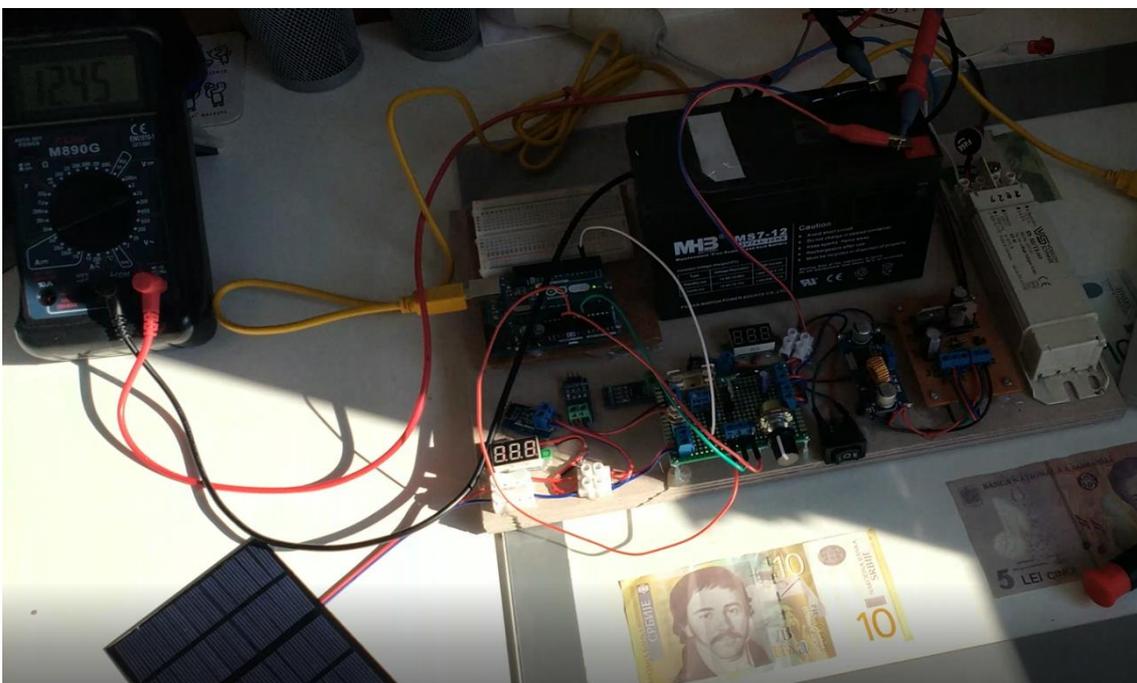
$$L_{min} = \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad [132]$$

En la siguiente figura se puede ver el montaje del boost en funcionamiento en la protoboard, a la izquierda se puede ver el multímetro midiendo la corriente con la que está cargando la batería, 120,2 mA, en el centro la temperatura del transistor 24°C y a la derecha la tensión de la batería que es de 12,9 V (el multímetro analógico sirve para más precisión).



*Fig. 5.4.4. Elevador de tensión en funcionamiento en protoboard*

En la siguiente figura, se puede ver el mismo circuito, pero una vez montado en la maqueta y con el panel solar conectado y alimentado por el sol, cargando la batería a 124,5 mA.



*Fig. 5.4.5. Elevador de tensión en funcionamiento en maqueta alimentado por el panel solar*

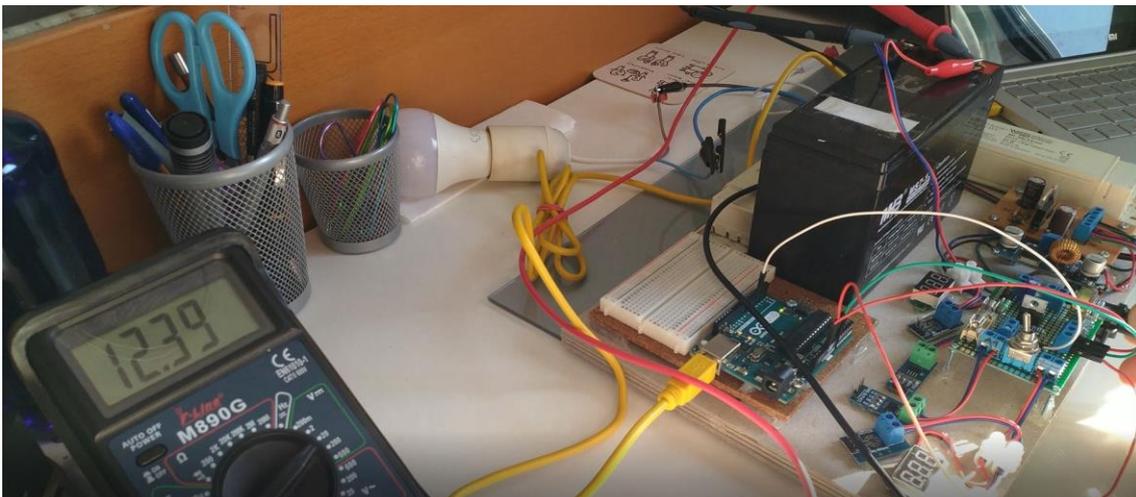


Fig. 5.4.6. Corriente medida con el multímetro con el elevador de tensión en funcionamiento

Si se quiere ver con más detalle, se puede ver el video adjunto al proyecto en el que se muestra y se explica el funcionamiento.

### 5.5. Diseño y montaje del Inversor

El diseño de inversor que se ha utilizado se basa en el concepto de regulación de corriente alterna AC-AC típico. Dos transistores en antiparalelo alternando la tensión continua con polaridades inversas a la salida.

Para la fabricación del circuito inversor se ha empleado el método del planchado que se resumirá más adelante. Consiste en una superficie constituida por “camino”, pistas de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener físicamente todos los componentes.

El primer paso es elegir los componentes y diseñar el circuito de forma esquemática. Para el diseño del circuito se ha utilizado el programa de automatización de diseño electrónico “EasyEDA”, para distribuir e interconectar los componentes.

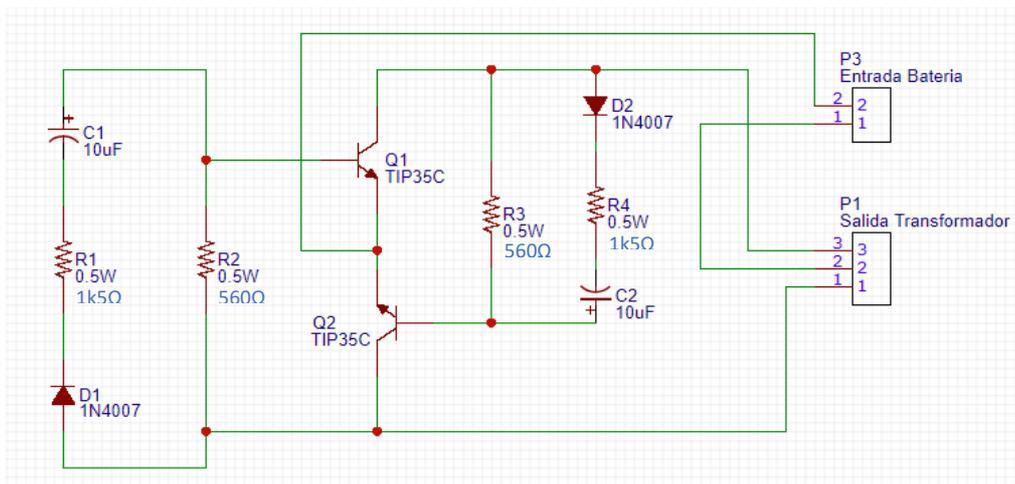


Fig. 5.5.1. Circuito esquemático del inversor

Explicación del circuito:

Los transistores Q1 y Q2 trabajan en antiparalelo, de forma que cuando uno conduce el otro está apagado. Esto deriva en que a la salida se obtiene la tensión de la batería con polaridades inversas, siendo el polo negativo de la batería el valor medio de las tensiones que se conectará a la toma intermedia del transformador.

- Estado 1: Q1 conduce, Q2 Corte
- Estado 2: Q1 corte, Q2 conduce

El circuito oscilador del sistema que logra la conmutación a una frecuencia estable de 50 hz, es un multivibrador astable [27], los transistores se polarizan directamente, con una onda cuadrada en la base, cuando la tensión en la base es positiva conduce uno y cuando es negativa lo hace el otro.

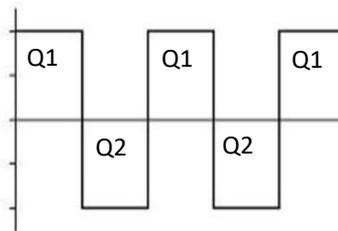


Fig. 5.5.2. Forma de onda en la base de los transistores

En la siguiente figura se puede ver el esquema típico de un multivibrador astable.

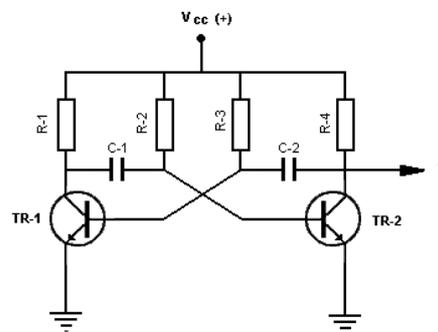


Fig. 5.5.3. Diseño típico de un multivibrador astable

Donde la frecuencia se define por la siguiente expresión.

$$f = \frac{1}{1.38 \cdot R \cdot C} \quad [133]$$

Siendo las unidades R en ohmios y C en faradios y f en Hercios.

Como se puede observar en el esquema del circuito de la próxima página, se pueden distinguir las dos partes del multivibrador astable, redondeadas en colores, donde R1, C1, D1 y D2, R4 y C2 forman los dos grupos para determinar la frecuencia de conmutación.

D1 y D2 logran que el transistor no se polarice directamente hasta superar los 0,7 V, ya que así se asegura la correcta polarización de los transistores, ya que sin D1 y D2, podrían generar ruido cuando la tensión pasa por 0 V.

El tiempo que tarda en conmutar del estado 1 al estado 2 viene dado por el tiempo que tarda C1 en descargarse desde los  $V_{cc}-0,7V$  hasta los  $-0,7V$  donde comienza a conducir el otro transistor, siendo  $V_{cc}$  la tensión conocida de la batería para este caso. El tiempo de conmutación viene dado por la siguiente expresión.

$$V_{final} = V(t) = E + (V_{inicial} - E) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad [134]$$

Donde E es la tensión en bornes de la batería con símbolo negativo, es decir,  $E = -V_{cc}$ . Y  $V_{inicial} = V_{cc} - 0,7$ , caída de tensión en el diodo y  $V_{final} = -0,7$ , la caída de tensión del diodo.

$$t = RC \cdot \ln\left(\frac{V_{inicial} - E}{V_{final} - E}\right) \quad [135]$$

$$t = RC \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot V_{cc} - 0,7}{V_{cc} - 0,7}\right) \approx RC \cdot \ln(2) \quad [136]$$

Por R2 y R3 circula corriente cuando la tensión no supera los  $\pm 0,7 V$ . Sin R2 y R3, ni los diodos D1 y D2, la tensión de salida sería cuadrada por lo que no funcionarían correctamente los transformadores, ya que sin variación de corriente no hay ni flujo ni campo magnético que inducir.

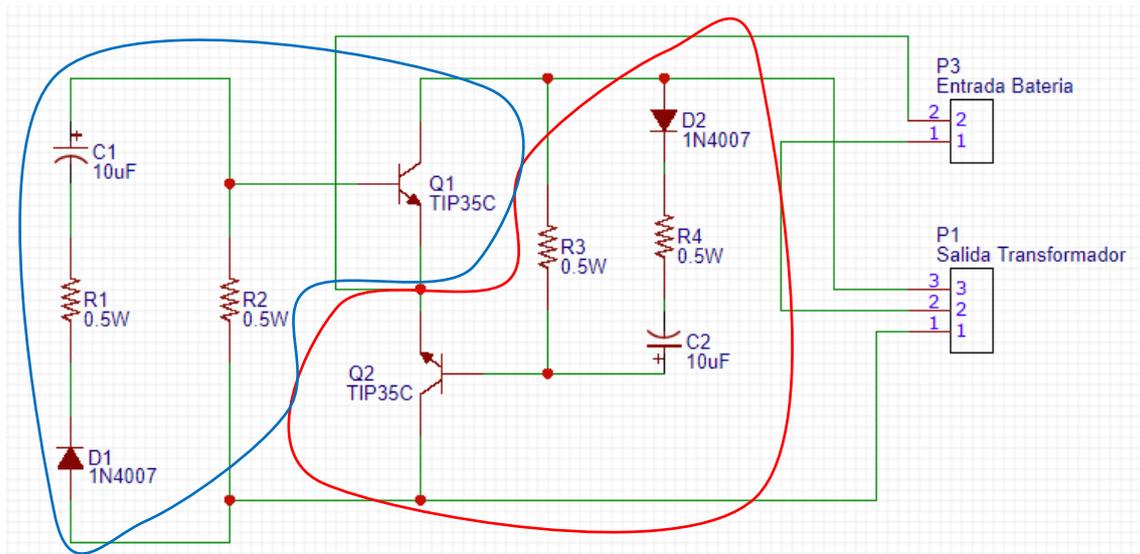


Fig. 5.5.4. Cicuto multivibrador astable del inversor

Las siguientes figuras muestran el resultado del proceso de montaje y la forma de onda en el osciloscopio, comparada con la forma de onda ideal explicada en el apartado 4 historia del arte.

Primero de todo, se puede observar que la tensión medida por el polímetro es de 233.5 voltios eficaces, con lo cual cumple con las expectativas.

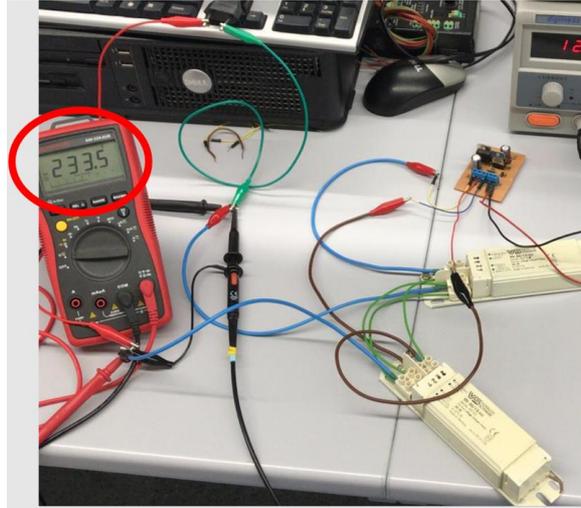


Fig. 5.5.5. Pruebas del Inversor en el laboratorio con el osciloscopio

Teniendo en cuenta que se ha empleado dos transformadores en paralelo con configuración de toma central 11,5 – 0 – 11,5 en el secundario y 230 – 0 en el primario, se obtiene que la relación de transformación es  $r_t = 20$ .

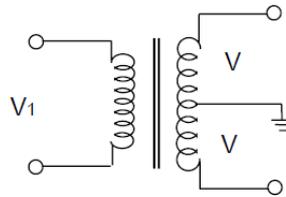


Fig. 5.5.6. Esquema transformador con toma intermedia

La forma de onda de la siguiente figura, es la forma ideal que se obtiene de un regulador de tensión alterna, esto se debe, como se ha explicado en el apartado 5 prototipo, a que el inversor empleado en el prototipo está basado en el principio de funcionamiento de un regulador de corriente alterna.

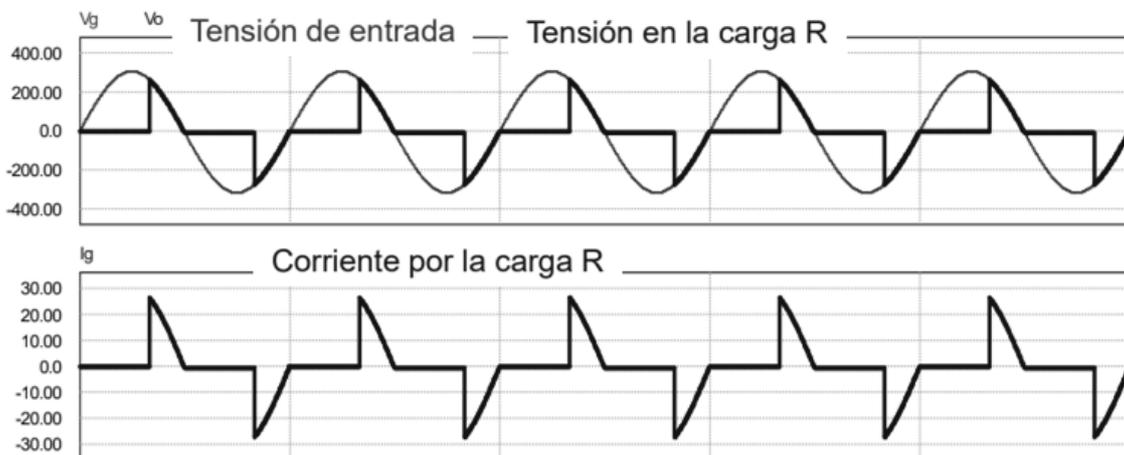


Fig. 5.5.7. Forma de onda ideal

Con el osciloscopio se puede ver la señal que se obtiene a la salida, se trata de una señal prácticamente idéntica a la ideal, salvo que, al haber pérdidas internas, se produce una pequeña curva en la parte inferior.

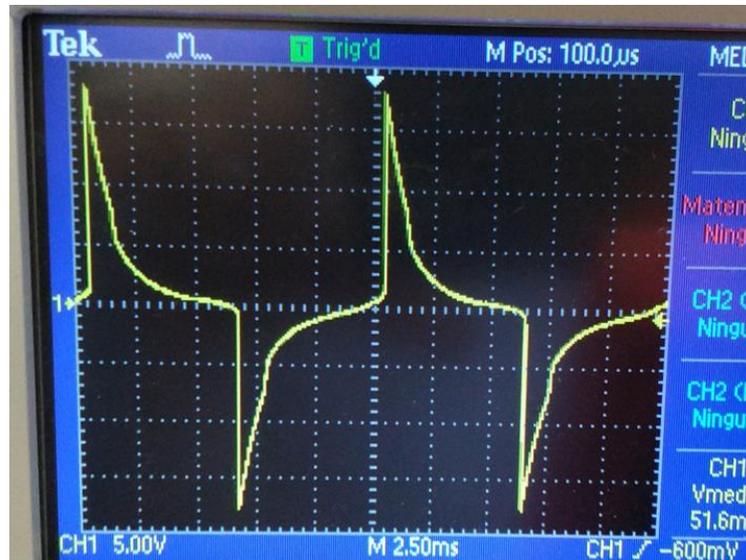


Fig. 5.5.8. Forma de onda real obtenida con el osciloscopio

### Rutado

Ahora se va a explicar el proceso de fabricación que se ha seguido para fabricar este circuito, es decir, cómo se convierte el esquema anterior en un esquema real listo para ser impreso sobre una PCB.

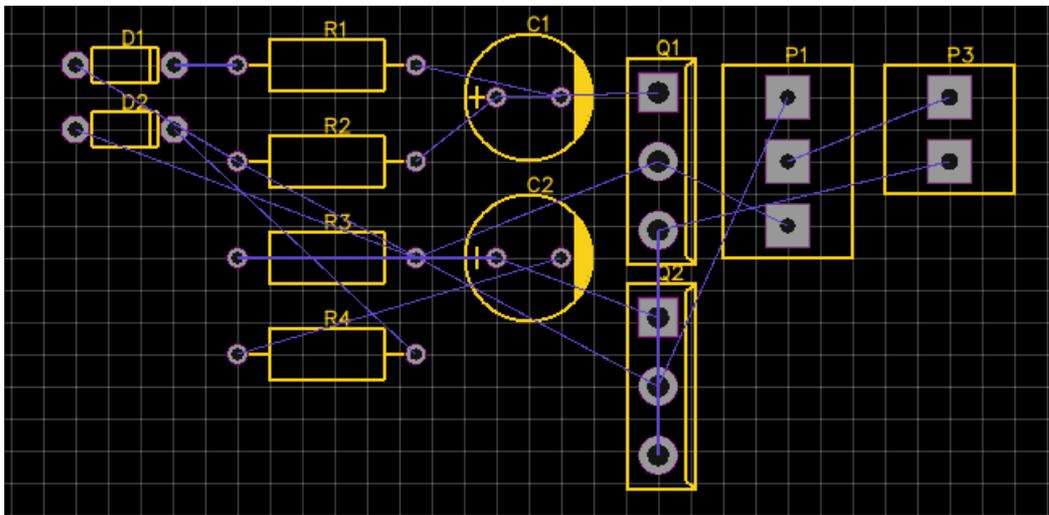


Fig. 5.5.9. Zoom Pre-Rutado

El programa EasyEDA genera una lista de nodos para todos los componentes de forma automática, es decir, una lista de los pines (o patillas) de todos los componentes del circuito junto con la posición de sus agujeros a tamaño real; por ello es muy importante seleccionar los componentes reales que se van a utilizar de las librerías del software, o si no existen, crearlos antes de hacer el rutado.

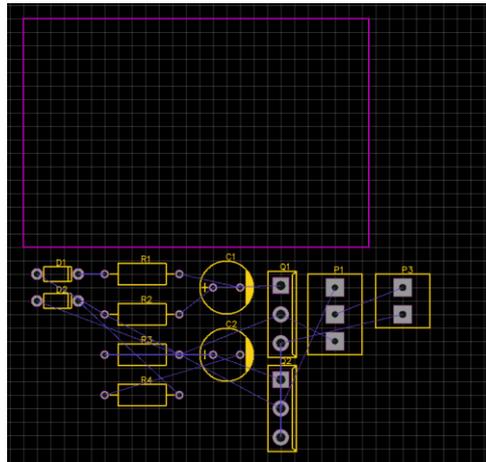


Fig. 5.5.10. Márgenes del Pre-Rutado

Antes de nada es muy importante marcar los márgenes que va a tener la PCB de forma que el diseño se adapte perfectamente al interior de los márgenes. En este caso se diseñan unos márgenes rectangulares suficientes para albergar todos los componentes.

El siguiente paso es determinar la posición de cada componente. La forma más sencilla de hacer esto es especificar una rejilla de filas y columnas “grid”, y colocar los componentes de forma que los hilos azules entre los pines de diferentes componentes no interfieran.

Existen placas con diferentes “layers”, se puede entender como diferentes “pisos” de un edificio por los que pueden unirse las pistas para poder hacer saltos entre pisos. En la mayoría de casos se utilizan varios pisos para generar un layer completo conectado al polo positivo, otro layer al polo negativo y utilizar los layers intermedios para conectar los componentes entre sí, aunque este tipo de placas no se pueden construir en casa, hay que encargarlas a alguna empresa dedicada a la fabricación de placas de varios “layers”.

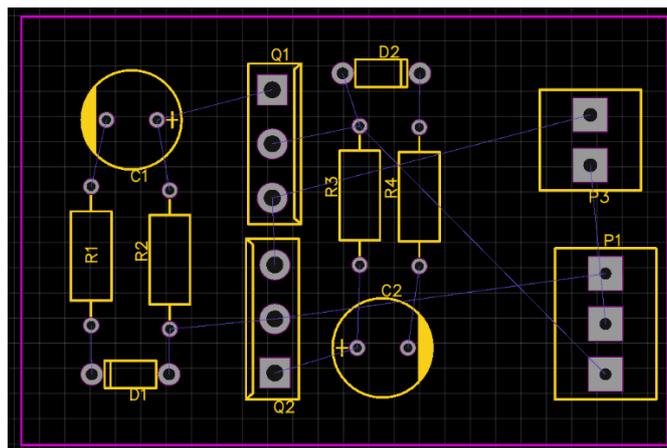


Fig. 5.5.11. Componentes colocados para el Rutado

Imagen 1. Componentes colocados para el Rutado

A continuación, una vez colocados los componentes se procede al rutado, lo primero es definir el ancho de pista y en la medida de lo posible reducir al máximo los ángulos rectos en las pistas ya que son más complejos de imprimir.

Una vez definida la curvatura de los giros y el ancho de las pistas se procede a conectar todos los componentes entre sí de forma que no se crucen las pistas.

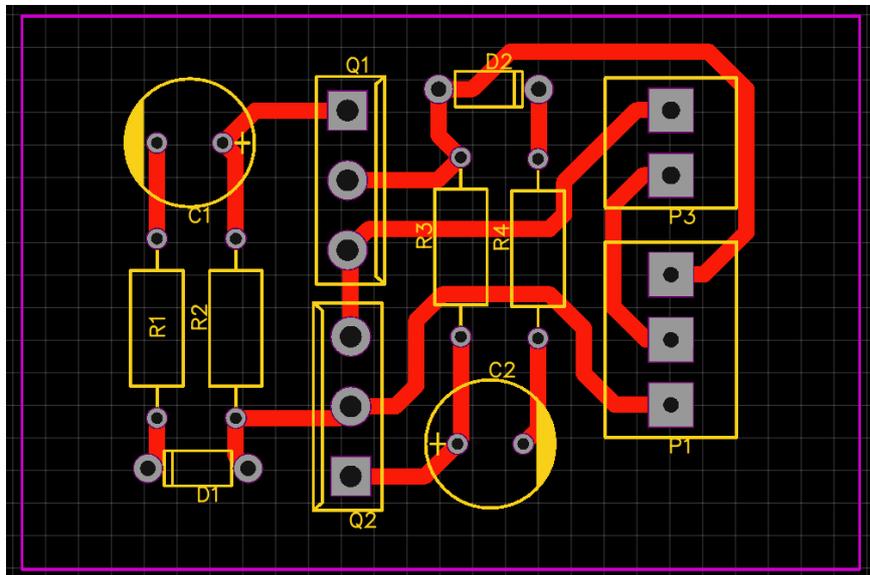


Fig. 5.5.12. Inversor Rutado

Una vez terminado el rutado del inversor, el objetivo es dibujar el circuito electrónico diseñado sobre la cara de cobre de la placa. Para ello, se va a utilizar una técnica de transferencia por calor del diseño impreso en papel a la placa de cobre.

El método del planchado

Primero se imprime en papel fotográfico con la máxima calidad posible. Se debe asegurar que la cara de cobre está limpia (sin partículas de polvo visibles) y seca.



Fig. 5.5.13. Circuito impreso en papel fotográfico a laser y placa de cobre

Ahora se coloca el papel sobre la cara de cobre de la placa de circuito impreso, recortando el exceso de papel en todos los lados menos en uno. Luego se aplicará calor con una plancha de forma uniforme, durante unos 5 minutos, hasta que el papel esté completamente pegado a la cara de cobre. El papel debe estar completamente en contacto con la cara de cobre para que, mediante transferencia de calor, la tinta del papel se pegue al cobre.

Después se requiere de un proceso de atacado químico, en el cual el cobre excedente es eliminado con un ácido, quedando únicamente el cobre que estaba tapado por las pistas de

tinta. Para elaborar este ácido se ha hecho uso de sulfamán y agua oxigenada, mezclando en una caja de plástico dos medidas de agua templada con una medida de agua oxigenada y otra de sulfamán.

Se debe sumergir la placa de circuito de impreso en el atacado ácido con cuidado, poco a poco se realizarán movimientos suaves oscilatorios para acabar de sumergir la placa de circuito impreso. Se puede observar que poco a poco, se va eliminando el cobre excedente. El proceso es relativamente lento y hasta pasado unos minutos no se observará cómo el cobre empieza a desaparecer. Debido a los gases que se desprenden, es conveniente realizar este proceso en un lugar ventilado.



Fig. 5.5.14. Disolviendo cobre con ácido

A medida que se va diluyendo el cobre la mezcla se va volviendo de color verde azulado. Al retirar la placa del ácido las conexiones de cobre quedan cubiertas por la tinta laser impresa. Por último, se limpia la placa con alcohol o acetona para eliminar los restos de tinta.

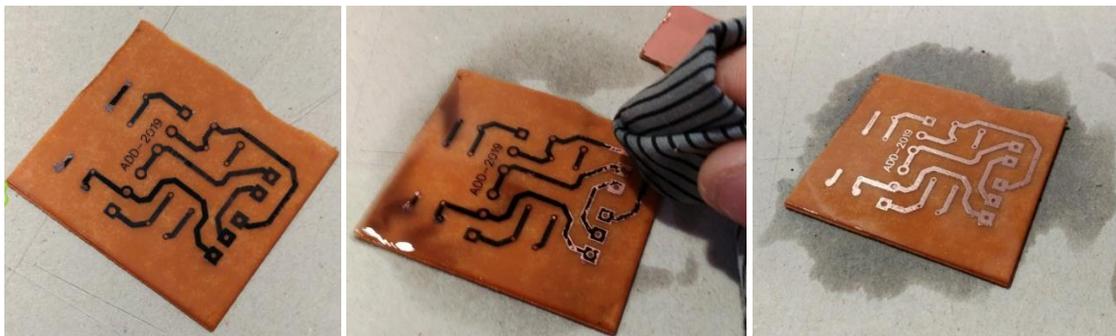


Fig. 5.5.15. Eliminando la tinta restante sobre las pistas de cobre y pulido (derecha)

Después de secarla se pasa una lija fina para quitar los restos de cobre hasta que quede brillante. Ahora la placa ya está casi lista, se perforan los agujeros con un taladro y se colocan los componentes como se ve a continuación:



Fig. 5.5.16. Componentes montados (izquierda) y circuito de potencia reforzado con estaño (derecha)

Finalmente se han recubierto las pistas del circuito de potencia con estaño (prácticamente todas) para reforzar las conexiones, evitar la oxidación y garantizar el correcto funcionamiento del montaje.

La tensión alterna que se obtiene a la salida es de la tensión de la batería, es decir, 12 V AC, aproximadamente, ya que depende de la carga y las pérdidas internas. Por lo que se conecta la salida del inversor a los transformadores con toma intermedia, la conexión de los transformadores se ha realizado de la siguiente forma.

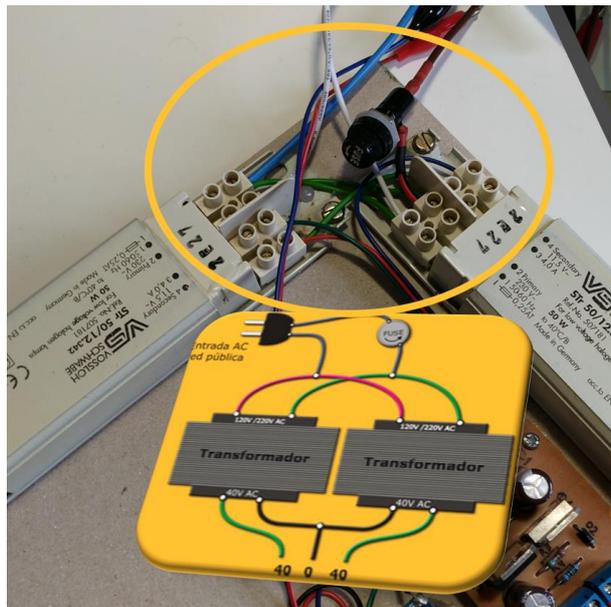


Fig. 5.5.17. Interconexión de dos transformadores para obtener toma intermedia

Ahora la salida se multiplica por la relación de transformación de los transformadores.

$$\text{Relación de transformación: } \frac{230V}{11.5V} = 20 \quad [137]$$

La salida del inversor en vacío es de aproximadamente 340V/50Hz, por lo que cuando se conecta una carga entre 1 W al máximo 25 W se obtiene una tensión de salida aproximada entre 240V a 180V respectivamente.

## 5.6. Maqueta del sistema de convertidores 12 V DC - 230 V AC

Una vez montados el boost y el inversor, se mostrará el montaje de la maqueta para el convertidor eléctrico con paneles solares, la función de esta maqueta, es convertir la energía del sol en energía alterna de 230 V AC.

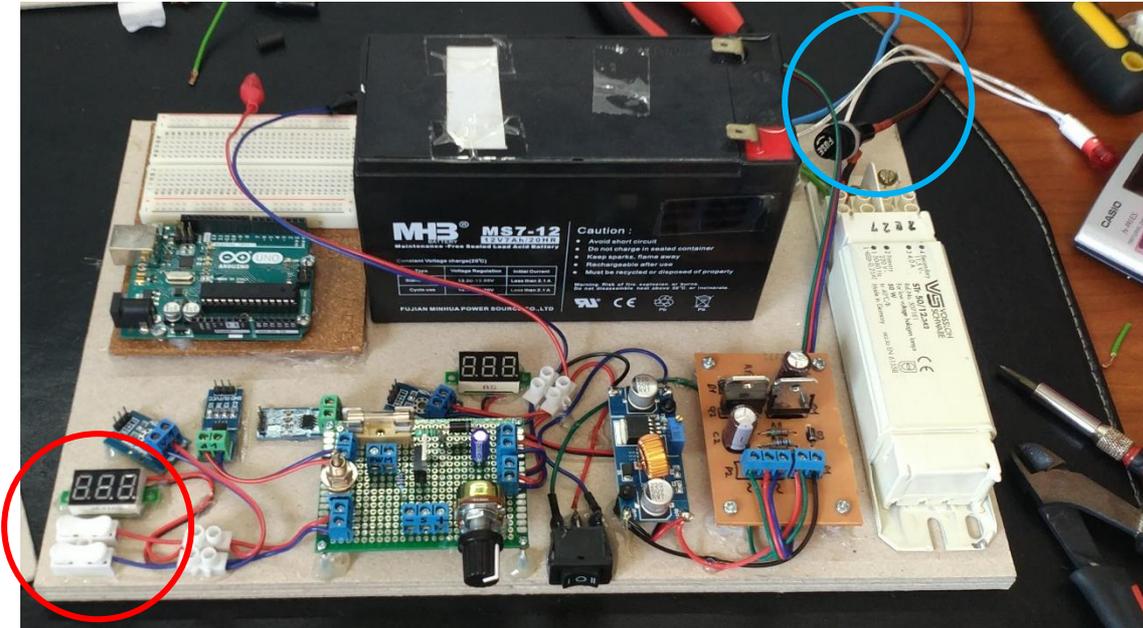


Fig. 5.6.1. Maqueta del sistema de convertidores solar a tensión alterna domestica

La entrada del grupo de convertidores es el círculo rojo donde se conecta el panel solar de 12 V, y la salida es el círculo azul, donde se conecta la carga, a la salida de los transformadores, es decir, 230 V AC.

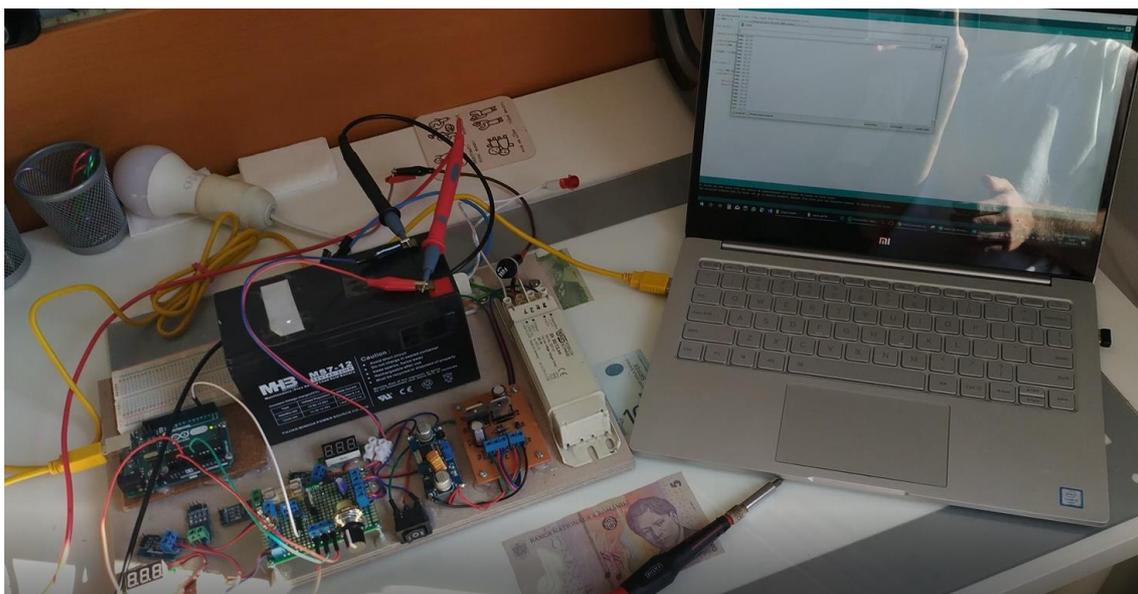


Fig. 5.6.2. Maqueta en funcionamiento con el programa de control del Boost

En esta figura se puede ver el sistema completo funcionando, con la comunicación con Arduino para el control del PWM, si se quiere ver con más detalles, se pueden visualizar los videos adjuntos.

### 5.7. Diseño y montaje del Regulador AC

El principal objetivo de este regulador de corriente alterna es el de poder regular la tensión a la salida del sistema para poder regular las condiciones de cualquier dispositivo que se desee; como por ejemplo la velocidad de un taladro, o la temperatura de un radiador, del soldador de estaño, la intensidad lumínica de una bombilla, etc.

Mediante este regulador de corriente alterna monofásica se pueden regular la tensión de 240V (o 110V) desde un valor prácticamente cero hasta el máximo y así, la carga que se conecte funcionará a más o menos potencia.



Fig. 5.7.1. Regulador de tensión alterna

Si se sobrepasa la potencia máxima, el triac puede romperse y cortocircuitarse internamente. Si esto ocurriera, podría darse el caso de que el usuario no se dé cuenta, ya que no suele verse nada roto, simplemente el regulador deja ejecutar su función, no regulará y por consiguiente siempre funcionará al máximo de potencia, como si se conectara la carga directamente a 240V.

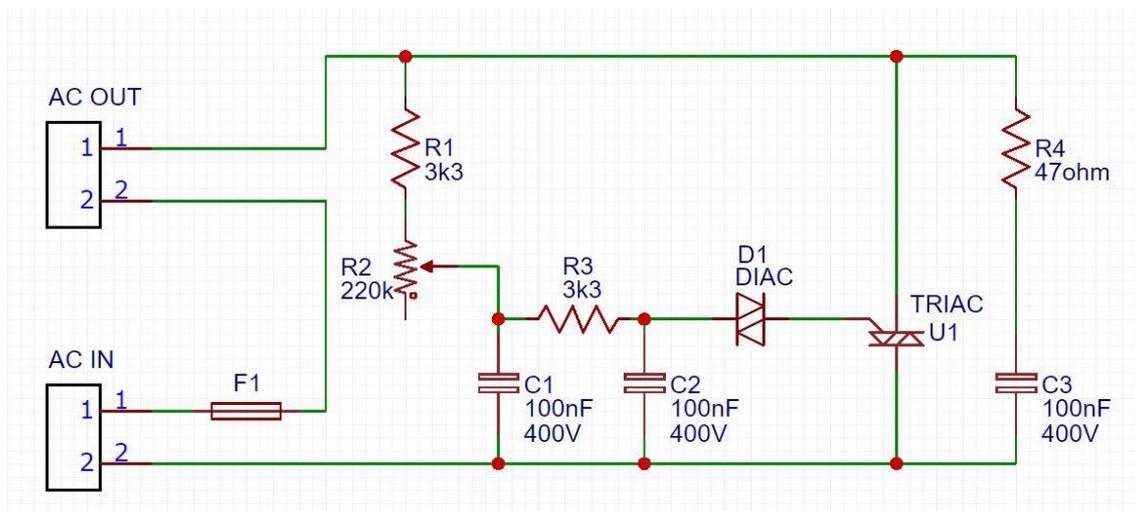


Fig. 5.7.2. Circuito esquemático del regulador de tensión alterna

El circuito esquemático tiene un funcionamiento muy simple, se basa en el disparo de un triac controlado por R2, que es un potenciómetro que controla la velocidad de carga y descarga de C1 y C2 después de que C2 dispare el triac cuando la tensión supere el umbral del diac, que hasta entonces la corriente circulara por R3.

Si se aplica tensión entre los terminales A1 y A2 (ánodo 1 y ánodo 2) del triac, en principio no pasa corriente, pero si se aplica un impulso de corriente al terminal "G" (gate) entonces comenzara a conducir.

El triac entra en conducción, y seguirá en conducción hasta que la corriente decrezca hasta un valor cercano a cero. En este caso, el triac deja de conducir. Esto está asegurado cada vez que la tensión pasa por cero, y esto es algo que sucede 50 veces por segundo en la corriente alterna doméstica.

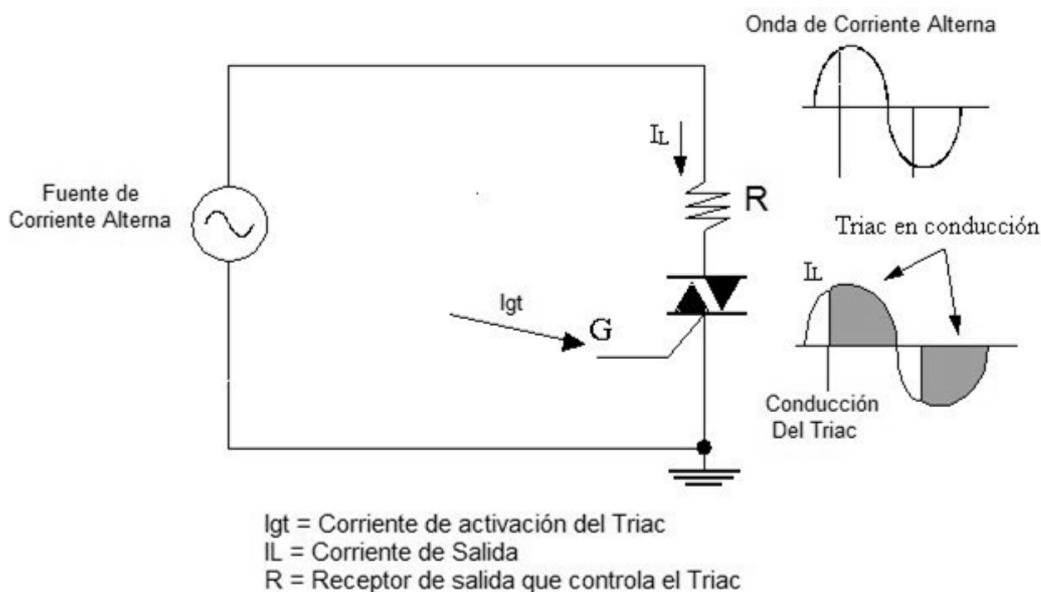


Fig. 5.7.3. Funcionamiento del Triac

Para conseguir que el impulso se aplique en la puerta del triac en el momento exacto que regula la tensión eficaz en la carga, se aprovecha la propia corriente alterna que se pretende regular, con la ayuda de una resistencia y un condensador. Se puede ver que R1, R2 (potenciómetro) y C1 están sometidos a la tensión nominal de 220 V / 50 Hz.

El condensador C1 se cargará en una u otra polaridad (según el semiciclo sea positivo o negativo) y lo va a hacer con una rapidez que dependerá del valor seleccionado en el potenciómetro R2.

A través del potenciómetro P1 y el condensador C1 pasa muy poca intensidad, pues el triac necesita muy poca corriente en su puerta para ser disparado. Por donde sí pasará mucha intensidad es a través del triac entre sus terminales A1 y A2, como se muestra en la imagen del circuito de potencia.

Un condensador se cargará con mayor o menor rapidez dependiendo de su propio valor de capacidad, y también del valor de la resistencia que le suministra esa corriente. Como R2 es variable, al girarlo se hacen que el tiempo que tarda en cargarse el condensador C1 también sea variable.

Con esto se consigue controlar cuando el impulso llegará a la puerta del triac (a través de R3 y el Diac), consiguiendo reproducir las condiciones de forma de onda representadas en los gráficos al final de este apartado.

Así pues, es como un triac puede regular la corriente alterna con ayuda de un potenciómetro y un condensador.

En la parte izquierda del esquema pueden verse dos conectores:

El de la parte superior será donde se conecte el dispositivo que vaya a ser regulado. Este dispositivo estará en serie con el circuito regulador.

El conector inferior es la entrada de 220-240V. esta corriente pasa por un interruptor, un fusible, y de ahí continuará al circuito a través de una regleta de conexión.

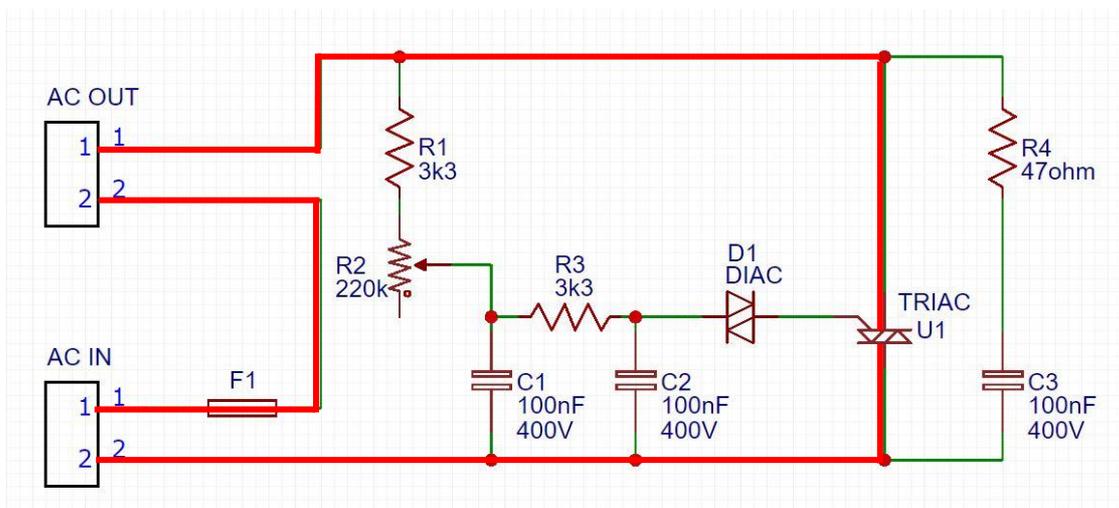


Fig. 5.7.4. Circuito de potencia del regulador AC resaltado en rojo

Según se puede ver en la imagen del circuito de potencia, toda la corriente que atraviese el dispositivo a regular también pasará a través del triac. El circuito principal de potencia es el cable exterior que se pueden observar que rodea los componentes interiores. Esos cables deberán ser de sección suficiente para que permitan pasar hasta 16 amperios según la carga que se conecte.

A continuación, se pueden observar tres formas de onda ideales en cada una de las cuales se observa que se puede producir el disparo del triac en momentos distintos del semiciclo.

Cuando se produce el disparo al inicio del semiciclo: El triac conducirá la mayor parte del tiempo (representado por la zona sombreada en ese gráfico). Esto significa que la corriente alterna pasa por el triac prácticamente en su totalidad.

El dispositivo que se conecte funcionará casi al máximo de potencia (máximo de potencia es 240V AC, como si no se conectara el regulador de tensión).

Cuando el disparo se produce en la mitad de la forma de onda: El triac sólo conduce la mitad del tiempo del semiciclo. La primera mitad permanece bloqueado, sin conducir. Esto significa que sólo la mitad de la corriente pasa a través del él. El dispositivo que se conecte en la salida regulada funcionará al 50%.

Cuando el disparo se produce casi al final del semiciclo: La mayor parte del tiempo el triac no conduce. Conducirá cuando el nivel de tensión está cercano a cero. La consecuencia: El dispositivo conectado a la salida regulada funcionará casi al mínimo o incluso no funcionará.

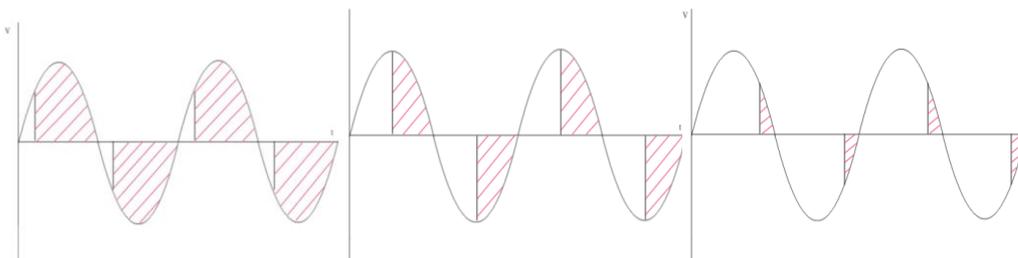


Fig. 5.7.5.  $D=75\%$ ,  $D=50\%$ ,  $D=25\%$  - Siendo  $D=Duty-Cycle$

Entre estos tres gráficos representativos se pueden comprender todos los valores posibles de regulación. Es decir, el disparo del triac por la aplicación de un impulso a su puerta puede producirse en cualquier momento. Esta es la forma de regular la cantidad de electricidad que pasa a través del triac y por consiguiente a través de la carga. Así determinando la potencia sobre la carga.

En la siguiente figura se pueden ver varias imágenes del montaje del regulador AC-AC, cabe destacar especial mención al aislamiento del dispositivo, la caja seleccionada, cumple con su función y además se ha añadido silicona caliente para mejorar aún más el aislamiento, ya que si no se tiene cuidado podría llegar a ser muy peligroso.



Fig. 5.7.6. Regulador AC en funcionamiento, regulando el filamento de una bombilla de 100W

No se han podido obtener las gráficas de la salida del convertidor, aunque se puede ver el funcionamiento en los videos adjuntos al proyecto.

## 5.8. Diseño y montaje de la Fuente de Alimentación de Laboratorio

Esta parte del proyecto trata de diseñar y construir una fuente de alimentación típica de laboratorio, capaz de regular de 0 V a 30 V y entregar una intensidad continua de hasta 3,5 A.

Para comenzar se va a explicar el diseño esquemático de la siguiente ilustración y cuál es la función de cada componente.

En primer lugar, este circuito se puede dividir en 3 partes muy simples, que al unir las dan lugar al conjunto funcional completo:

- Rectificador AC-DC
- Control y Regulación de BAJA potencia
- Control y Regulación de ALTA potencia

### Rectificador AC-DC

Esta parte del esquema es la más sencilla, la Resistencia R1 tiene una función esencial que se explicará más adelante.

El resto de componentes son los típicos de cualquier rectificador, a la entrada está el transformador, que en este caso uno de 230 V a 24 V, de forma que la tensión rectificada máxima que se puede obtener es:  $24 \cdot \sqrt{2} = 33,94 \text{ V}$  que se van a limitar a 30 V por seguridad.

Los condensadores deben tener una tensión nominal superior a 33,94 V más las posibles variaciones de tensión en la red de entrada por lo que es muy importante que sean de al menos 40 V, se han seleccionado todos los condensadores de 50 V.

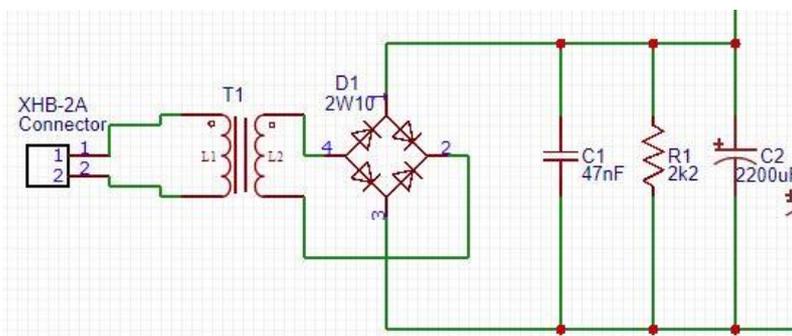


Fig. 5.8.1. Circuito esquemático del rectificador incluido R1 (circuito descarga condensador)

Después, la tensión se rectifica en un rectificador de doble onda del tipo puente de Graetz, en el que se filtra mediante los condensadores C1 y C2, uno electrolítico de alto valor capacitivo (C1, el principal), y otro (C2) cerámico de bajo valor capacitivo para el filtrado del ruido de alta frecuencia.

El siguiente circuito se trata de la fuente de alimentación regulada, como se explica en el apartado de modelo práctico, fuente de alimentación, el diseño de esta fuente de alimentación se basa en el diseño de tres circuitos muy sencillos unidos.

Para empezar un rectificador de onda completa, basado en el típico circuito de rectificación, el puente de Graetz.

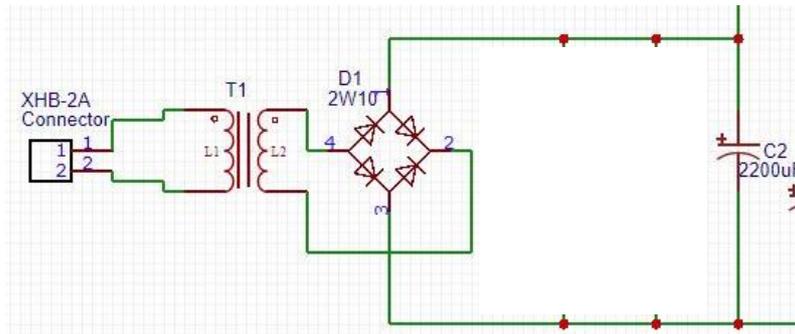


Fig. 5.8.2. Circuito esquemático del rectificador

Como se puede ver, es un simple circuito rectificador de diodos, el cálculo se realiza mediante las siguientes ecuaciones.

$$V_o = V_i \cdot \sqrt{2} \quad [138]$$

$$V_{sec} = V_{pri} \div rt \quad [139]$$

El valor medio de la corriente en la carga.

$$I_c = \frac{V_c}{R} \quad [140]$$

El valor del rizado.

$$r = \frac{I_c}{f \cdot C} \quad [141]$$

Tensión media en los diodos.

$$V_d = \frac{I_c}{2} \quad [142]$$

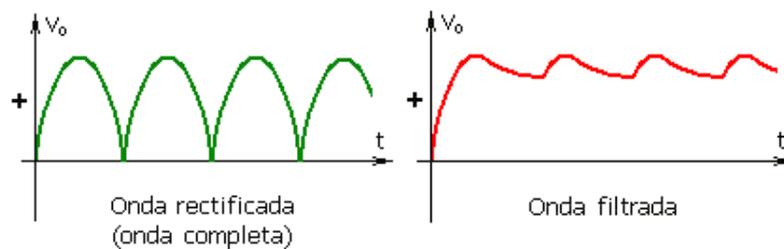


Fig. 5.8.3. Onda senoidal rectificada (izquierda) y filtrada (derecha)

Tras esto, se puede pasar a explicar la segunda parte del circuito.

### Control y Regulación de BAJA potencia

Esta parte se basa en el circuito típico de un LM 317 T para la regulación de la tensión, se trata de uno de los reguladores de tensión lineales variables más comunes, la desventaja es que la intensidad pasa por el LM 317 T por lo que para que pueda circular una corriente de 3.5 A, se ha de introducir un circuito de potencia que se verá en la siguiente parte del circuito.

Se trata de un circuito integrado específico para realizar una función concreta, regulación de tensión variable, por lo que, se ha seguido el diseño propuesto por el fabricante.

El diseño del circuito empleado es el siguiente (izquierda) y el propuesto por el fabricante (derecha), como se puede ver, es casi idéntico.

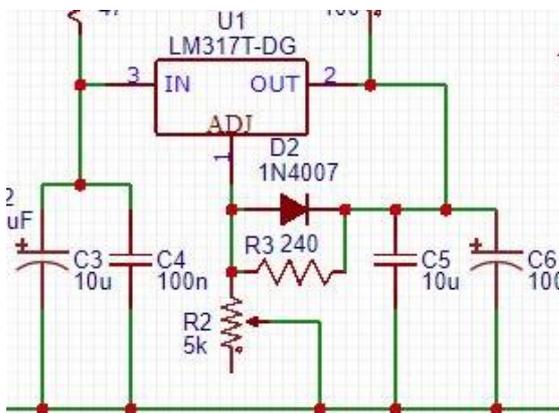
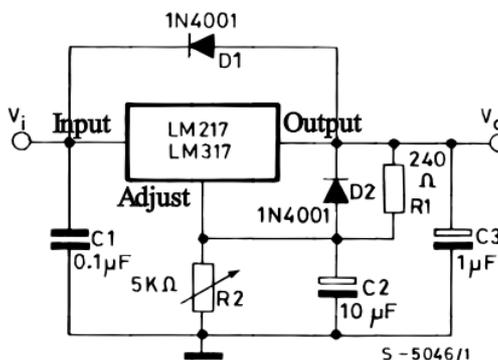


Fig. 5.8.4. Circuitos reguladores de tensión con LM317

Figure 7. Voltage regulator with protection diodes



Una de las diferencias es que, en el diseño, se han empleado C4 y C5 para reducir el ruido de alta frecuencia, y no se ha empleado el diodo de seguridad D1 presente en el circuito original del datasheet.

R2 es el potenciómetro que regula la tensión a la salida del LM 317 T, los componentes D2 y R3 sirven para que R2 no tenga que disipar toda la tensión y cuando se apague la fuente de alimentación se descarguen los condensadores de salida C5 y C6.

Por último, se puede proceder a explicar la parte de amplificación de corriente.

### Control y Regulación de ALTA potencia

En este apartado se puede ver el control y regulación de potencia. Esta fuente está pensada para que puedan circular hasta 3,5 A, la base del transistor Q1 se activa con la corriente que aporta el LM 317 T, es decir, con la tensión que se regule en el LM.

Pero la fuente, es ampliable en intensidad hasta el límite impuesto por la intensidad que puede manejar el LM 317 T (1 amperio), es decir, se pueden conectar en paralelo a Q1 tantos transistores, como corriente de base sea capaz de entregar el LM 317 T.

Si la base de Q1 al máximo (30 V) consume 200 mA, se podrían conectar hasta 4 transistores más iguales que Q1, en paralelo para poder entregar hasta  $[(3,5 \text{ A} \cdot 5 \text{ Q}) = 17,5 \text{ A}]$  idealmente. Con R6 bajo valor, por ejemplo; 0,22Ω. Y los transistores conectados de la siguiente forma, (colectores unidos a la entrada positiva rectificada, y bases y emisores conectados entre sí respectivamente).

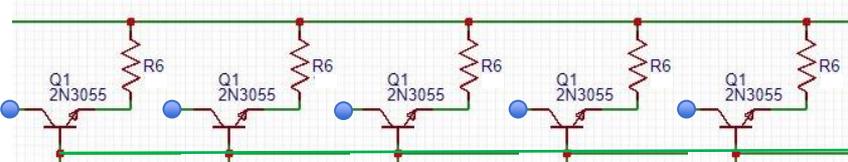


Fig. 5.8.5. Transistores en paralelo para aumentar la capacidad de entrega de corriente

Aunque sería necesario poner disipación térmica tanto a los 2N3055 como al LM317.

Se puede ver, que una pregunta muy obvia seria porque hay tres diodos en serie con la base del transistor; la respuesta es que sirven para limitar la tensión máxima que entrega el LM 317 de forma que, en lugar de 30 V máximos, caen 3 veces 0,7 V. Así, siempre, incluso al máximo de tensión hay menor tensión en la base del transistor Q1 que en el Colector de Q1.

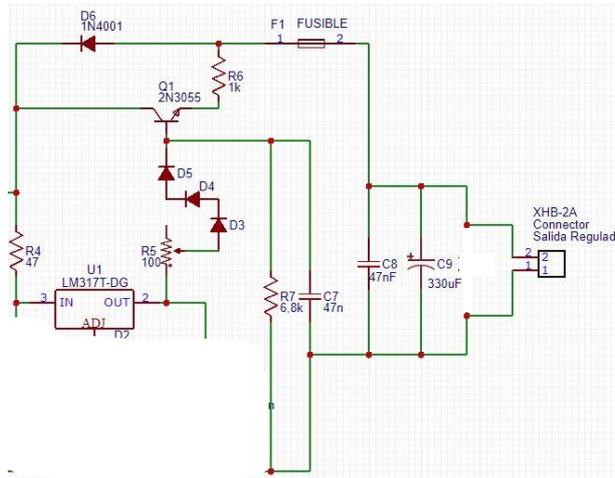


Fig. 5.8.6. Circuito esquemático del amplificador

R7 sirve para que cuando Q1 conduce en dirección Colector Base o Base Emisor, la corriente pueda circular hacia GND.

C7 filtra los picos de tensión en la base del transistor. C8 y C9 filtran la salida de la fuente de alimentación para obtener así la salida más continua posible.

Para obtener calcular los componentes y el nivel de amplificación del transistor, se emplean las ecuaciones generales de los transistores.

$$\alpha F = \frac{I_c}{I_E} \quad [143]$$

$$\beta F = \frac{I_c}{I_b} \quad [144]$$

$$\beta F = \frac{\alpha F}{1 - \alpha F} \leftrightarrow \alpha F = \frac{\beta F}{\beta F + 1} \quad [145]$$

Por último, se van a ver un par de principios de funcionamiento del conjunto completo, entre ellos el circuito de descarga del condensador de filtrado principal C2, ya que se trata de un componente especialmente peligroso debido a que siempre está cargado a aproximadamente 34 V y tiene una capacidad enorme de 4700 uF. En primer lugar, se iba a colocar uno de 2200 uF, pero se disponía de uno de mayor capacidad en stock por lo que se ha empleado uno de 4700 uF (que es excesivamente grande).

Tanto que el diseño de R1, 2k2 de 0.5 W, no sirve y ha sido necesario colocar una resistencia de 3k3 y 0.5 W. La potencia disipada con la de 2k2 superaba los 0.5 W y la resistencia se calentaba demasiado, ahora con la de 3k3, la potencia disipada no supera lo 0.35W por lo que no se calienta en exceso.

$$V = I \cdot R \rightarrow 34 V = I \cdot 3k3 \rightarrow 10mA \rightarrow 10mA \cdot 34 V = P_{max} \rightarrow P_{max} = 0.35 W \quad [146]$$

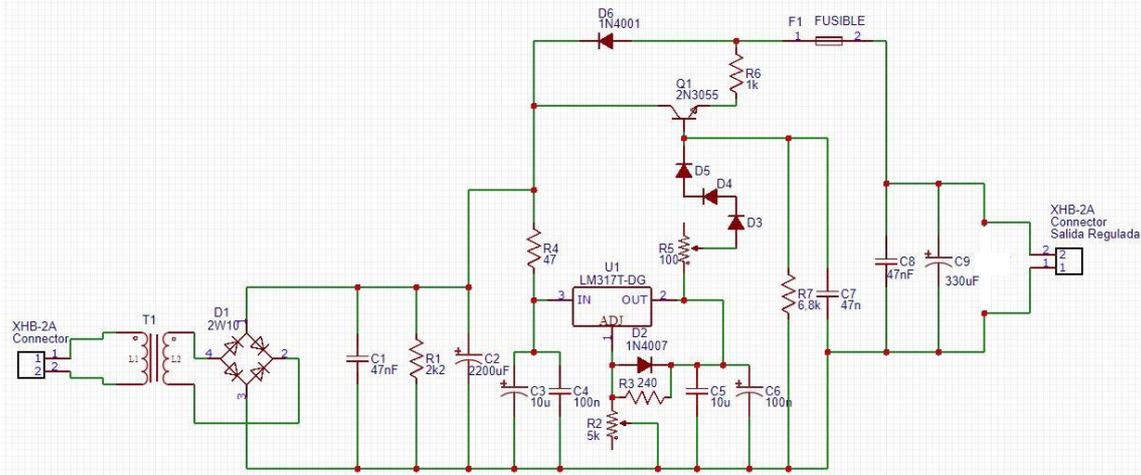


Fig. 5.8.7. Circuito esquemático completo de la fuente de alimentación de la boratorio 30V 3,5A

Otro componente a comentar es R5 que sirve para ajustar el valor máximo de tensión al que llegara la fuente de alimentación, así se puede ajustar la fuente a la instrumentación analógica con precisión.

En las siguientes figuras, se puede ver el montaje de la fuente de alimentación, la primera imagen se trata del esquema montado en la protoboard, para probar que funciona, antes de fabricar la PCB.

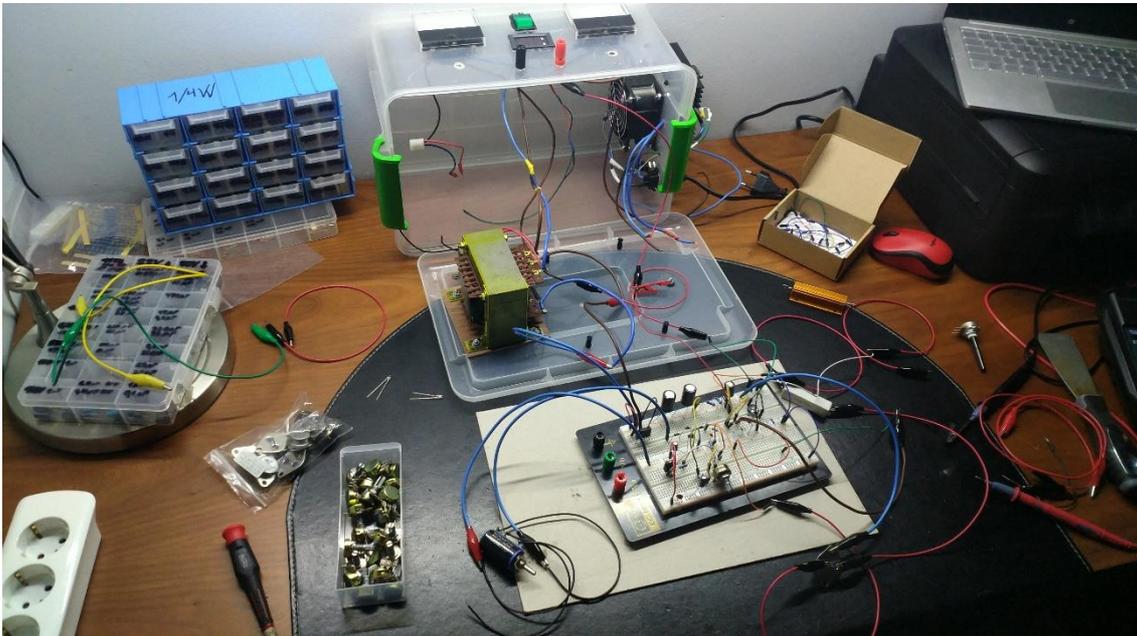
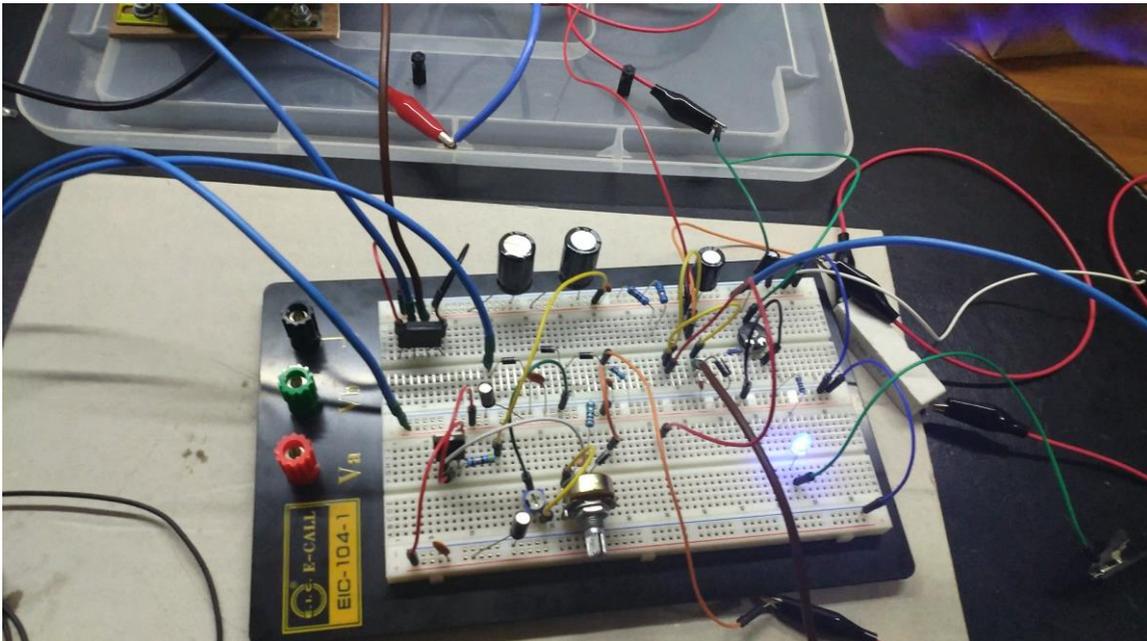


Fig. 5.8.8. Testeo del funcionamiento del circuito en la protoboard

Entre los componentes de la imagen se pueden observar el transformador y la instrumentación analógica junto con el interruptor y el sistema de disipación adheridos a la caja.



*Fig. 5.8.9. Zoom de la protoboard*

Se puede ver un zoom de la figura precedente de cuando se testeaba el sistema en la protoboard.

Por último, se puede ver cómo queda el montaje final de la fuente de alimentación de laboratorio.



*Fig. 5.8.10. Fuente de alimentación de laboratorio finalizada*

## 5.9. Hardware Arduino

Para la medición de los parámetros del circuito se ha utilizado un microprocesador Arduino.

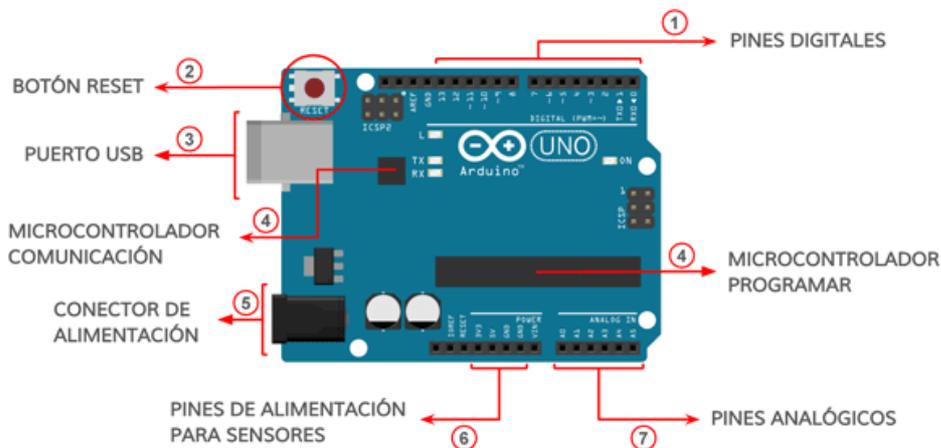


Fig. 5.9.1. Conexiones de Arduino

Sensores:

Sensor de tensión:

Es un módulo simple pero muy útil que usa un divisor de potencial para reducir cualquier voltaje de entrada por un factor de 5. Esto le permite usar la entrada analógica de un microcontrolador para monitorear voltajes mucho más altos de lo que es capaz de detectar. Por ejemplo, con un rango de entrada analógica de 0-5 V, puede medir una tensión de hasta 25 V.

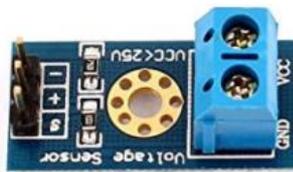


Fig. 5.9.2. Sensor Tensión Arduino FZ0430

Sensor de corriente:

El ACS712 es un sensor de corriente tanto alterna como continua, que permite medir la intensidad eléctrica que atraviesa un conductor.

Internamente el ACS712 consiste en un sensor hall de precisión y bajo offset junto con un canal de conducción localizado cerca de la superficie del integrado. Cuando la corriente fluye por el canal de cobre genera un campo magnético que es detectado por el sensor Hall y es convertido en una tensión.

La salida del sensor es una tensión proporcional a la corriente, y altamente independiente de la temperatura. El sensor viene calibrado desde fábrica, aunque para una medición de precisión hará falta un ajuste de la calibración.

El camino conductor está aislado galvánicamente del IC garantizado un mínimo 2.1 kVRMS Su resistencia es muy baja, 1.2 mΩ, lo que se traduce en pequeñas pérdidas.

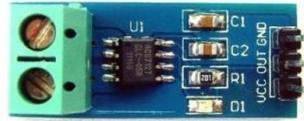


Fig. 5.9.3. Sensor corriente Arduino ACS712

## 5.10. Software Arduino

A continuación, se explicarán los pasos que se han seguido para la realización del código y sus diferentes apartados.

Antes de nada, comentar que el software no ha quedado completamente desarrollado para ejecutar todas las funciones que se pretendía, ya que fue lo primero que se desarrolló del proyecto y al principio se pensó para ejecutar varias funciones, y todas al mismo tiempo, además de que ha habido más de un cambio desde la idea principal del TFG a la idea final, entre los programas que se pensó desarrollar, se encuentran los siguientes:

- Controlar el PWM del elevador de tensión.
- Medir la tensión, corriente y potencia de la entrada y salida de la batería de 25.2 V Li-Ion en configuración 6S2P y medir su capacidad en porcentaje y muestrearla mediante unos Leds de forma lumínica, (al final solo se ha colocado una batería de 12 V de plomo ya que al principio todos los convertidores presumían ser de mayor potencia).
- Instrumentación de entrada y salida del Boost.

De las 3 funciones mencionadas, se han desarrollado las dos primeras, y, además, entre ellas la primera, es la más compleja. Es decir, se ha desarrollado el control del PWM del elevador de tensión, y la instrumentación de entrada y salida y porcentaje lumínico de la batería Li-Ion 6S2P de 25,2 V de tensión máxima con "Battery Management System" (que al final no se ha utilizado, habiendo sido sustituida por una sola batería de 12 V, debido a que el desarrollo de esta batería con BMS habría imposibilitado el desarrollo del resto de convertidores).

### *PROGRAMA PARA EL CONTROL DEL PWM DEL ELEVADOR DE TENSIÓN*

En la siguiente figura se puede ver el código para la conmutación del transistor del tipo "Mosfet", encargado de la elevación de tensión en el "boost".

Se trata de un código bastante sencillo en el que se hace "setup" de las variables y del "serial.begin" para poder visualizar los valores del potenciómetro.

Después se inicializan los pines 3 y 11 (por si el 3 deja de funcionar) para que entreguen una señal PWM de 31,4kHz (valor típico para la conmutación de reguladores elevadores de tensión).

Por último, se realiza el "loop" en el que se hace un bucle sencillo de actualización del valor PWM en cada instante y lo imprime por pantalla.

El código empleado se muestra en la siguiente figura.

```
Programa_Arduino_Boost_FUNCIONA $

int potenciometro = A0; //La entrada del potenciometro es A0
int PWM = 3;          //La salida de la señal PWM es D3

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  pinMode(potenciometro, INPUT);
  pinMode(PWM, OUTPUT);

  TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000001; // pin 3 y 11 PWM frecuencia de 31372.55 Hz
}

void loop() {

  float PWM_valor = map(analogRead(potenciometro), 0, 1024, 0, 255);
  analogWrite (PWM, PWM_valor);

  Serial.print("\nPWM: ");
  Serial.print(PWM_valor);
}
}
```

Fig. 5.10.1. Código para la conmutación del Boost

Simplemente se muestra por pantalla el valor en cada instante del duty-cycle del PWM, de 0 a 255, como se puede ver en la siguiente figura.

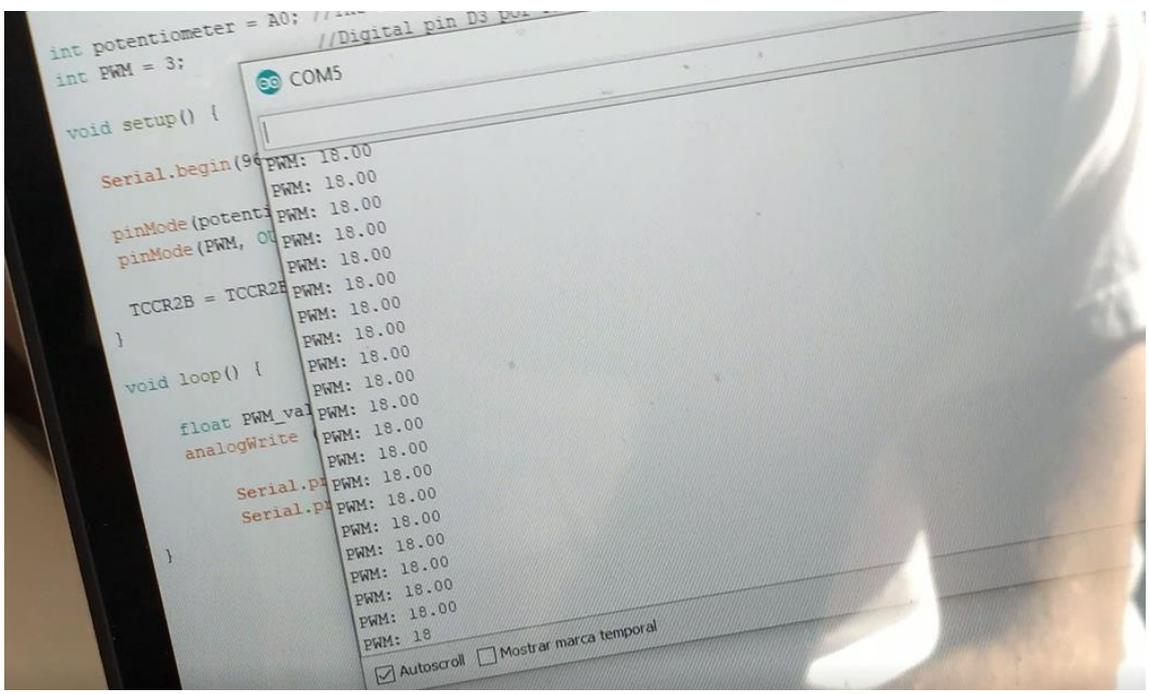
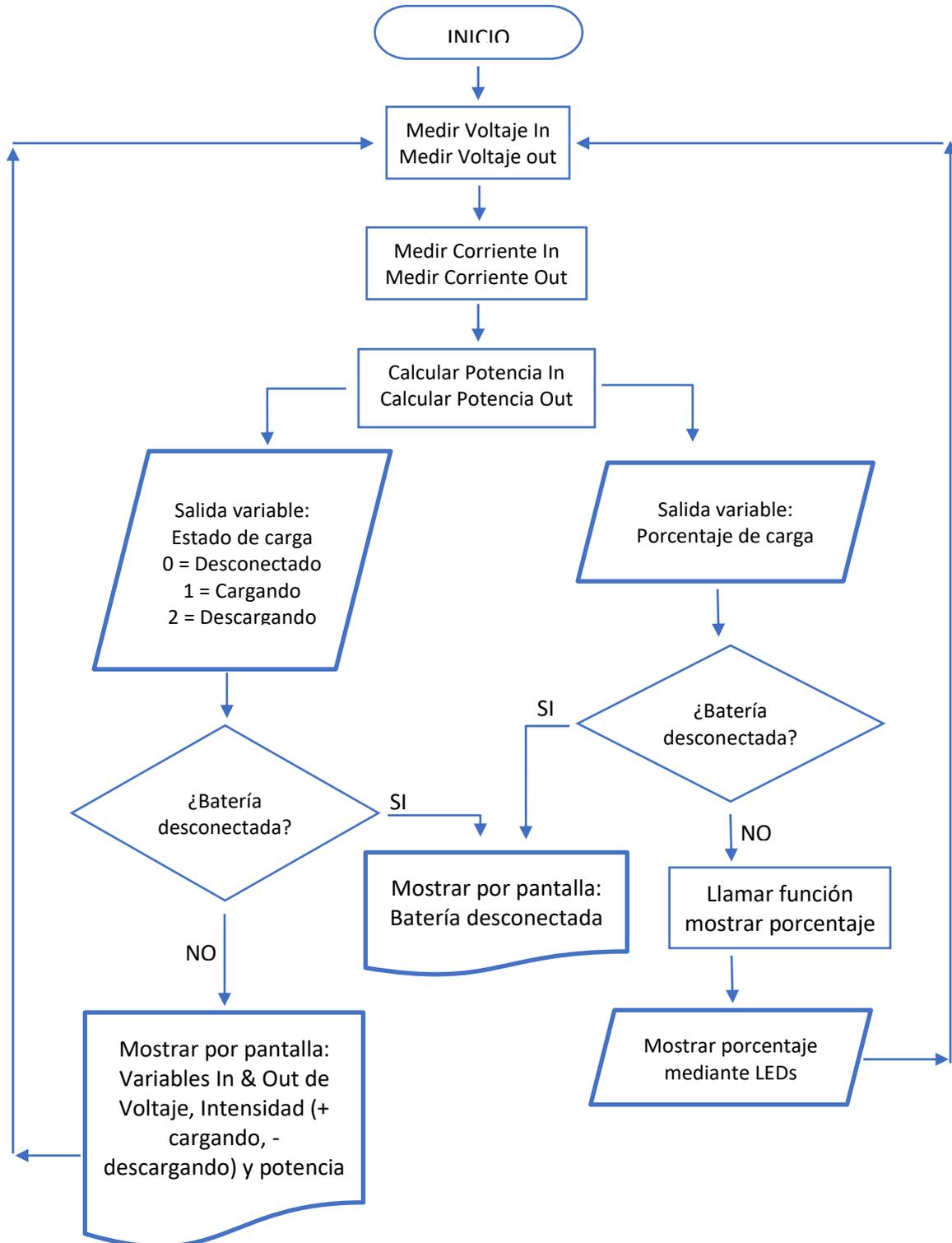


Fig. 5.10.2. Salida por pantalla del programa del control del PWM

Para verlo con más detalle, es mejor visualizarlo en el video, ya que al actualizar muy rápido los valores, en una imagen casi no pueden apreciarse los cambios en valor del PWM al girar el potenciómetro.

*INSTRUMENTACIÓN DE LA BATERÍA Y PORCENTAJE DE CARGA*

Diagrama de flujo del programa de instrumentación y porcentaje de la batería.



En primer lugar, se programó el microcontrolador Arduino para medir corrientes, tensiones, y porcentaje de carga de la batería de 25,2V Li-Ion 6S2P. Así como las tensiones corrientes y potencias de la salida del convertidor seleccionado.

En la siguiente imagen se puede observar la declaración de entradas para los sensores de tensión, ya que para los de corriente se declaran en la propia función.



```
MedirCuatroSimplificadoMasPOTENCIA Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
MedirCuatroSimplificadoMasPOTENCIA
int Sensor1 = A1;
int Sensor3 = A3;

//int sensorcorriente = A0; (no es necesario declarar)

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void printMeasure(String prefix, float value, String postfix)
{
  Serial.print(prefix);
  Serial.print(value, 3);
  Serial.println(postfix);
}
```

Fig. 5.10.3. Setup código Arduino

Lo primero a programar es el “setup” del programa Arduino y, además, se añade una función que escribirá los resultados de forma normalizada ( $x = variable$ ):

*Intensidad x A, Voltaje x V, Potencia x W*

Para ello se ha realizado la función que imprime un prefijo, un número con un máximo de tres decimales y un sufijo. La función que se ha comentado en el párrafo anterior, “printMeasure”.

```
void loop() {
    float voltaje1 = (float)25*analogRead(A1)/1023; //Funcion que mide el Voltaje1
    float voltaje3 = (float)25*analogRead(A3)/1023; //Funcion que mide el Voltaje3

    float corrientemedia0 = 0; //Funcion que mide la corriente0
    for(int i = 0; i < 1000; i++)
    {
        corrientemedia0 = corrientemedia0 + (.0264 * analogRead(A0) -13.51) / 1000;

        //5A mode, if 20A or 30A mode, need to modify this formula to
        //(.19 * analogRead(A0) -25) for 20A mode and
        //(.044 * analogRead(A0) -3.78) for 30A mode
        delay(1);
    }

    float corrientemedia2 = 0; //Funcion que mide la corriente
    for(int l = 0; l < 1000; l++)
    {
        corrientemedia2 = corrientemedia2 + (.0264 * analogRead(A2) -13.51) / 1000;

        //5A mode, if 20A or 30A mode, need to modify this formula to
        //(.19 * analogRead(A0) -25) for 20A mode and
        //(.044 * analogRead(A0) -3.78) for 30A mode
        delay(1);
    }
}
```

Fig. 5.10.4. Bucle “loop” para las mediciones con Arduino

En la imagen superior se puede ver el código dentro del bucle “loop”. Para empezar, se realizan las mediciones de los dos voltajes y después las de las dos corrientes, los dos rectángulos rojos. Después, se realiza la multiplicación de ambas medidas para obtener las potencias, como se puede ver en el primer recuadro.

```
float potencial = voltaje1 * corrientemedia0;
float potencia2 = voltaje3 * corrientemedia2;
```

```
printMeasure("Voltaje1: ", voltaje1, "V ,");
printMeasure("Corriente1: ", corrientemedia0, "A ,");
printMeasure("Potencial: ", potencial, "W ,");
```

```
printMeasure("Voltaje2: ", voltaje3, "V ,");
printMeasure("Corriente2: ", corrientemedia2, "A ,");
printMeasure("Potencia2: ", potencia2, "W ,");
```

```
delay(500);
}
```

Compilado

```
El Sketch usa 5606 bytes (17%) del espacio de almacenamiento de programa.
Las variables Globales usan 294 bytes (14%) de la memoria dinámica, dejando
```

Fig. 5.10.5. Funciones para imprimir las variables por pantalla

Por último, se ha empleado la función “printMeasure” (definida en la imagen, segundo recuadro) que imprime en horizontal las medidas de forma normalizada con tres decimales.

Una vez definidas las mediciones con Arduino se realiza la ampliación del código para introducir una mejora visual que sea capaz de mostrar mediante unos LED el estado de la carga de la batería, entre un rango de 20% y 100% (20, 40, 60, 80 y 100) %.

Se ha probado con las fuentes de alimentación de laboratorio, simulando que estas fuentes son la batería, de forma que se podía hacer que cargase o descargase a como se deseara, y así, variar del 0% al 100% de carga sin someter a estrés a la batería y sin tener que esperar a que se cargue o descargue).

Los resultados muestreados por pantalla se muestran en el apartado resultados de este trabajo de fin de grado.

El código programado en Arduino es el siguiente (las explicaciones de cada línea se encuentran en Naranja):

```
int Sensor1 = A1; //Se declaran los sensores de tensión, los de corriente se declaran
en la propia funcion
int Sensor3 = A3;
int led_rojo20 = 2; //Se declaran las variables de los LEDs en los digital outputs sin
PWM
int led_amarillo40 = 4; //Como se puede ver el porcentaje varia de 20% en 20%
int led_verde60 = 7;
int led_verde80 = 8;
int led_azul100 = 12;
int estado_cargadescarga; //Aquí se declaran las dos variables auxiliares que se
utilizarán para los LEDs
int porcentaje_bateria;
void setup() { //Esta función configura las salidas de los outputs digitales de los LEDs
  Serial.begin(9600);
  pinMode(led_rojo20,OUTPUT);
  pinMode(led_amarillo40,OUTPUT);
  pinMode(led_verde60,OUTPUT);
  pinMode(led_verde80,OUTPUT);
  pinMode(led_azul100,OUTPUT);
}
void loop() { //Esta es la función principal que compone el código, el loop
  float voltaje1 = (float)25*analogRead(A1)/1023; //Función que mide el Voltaje
de las baterías
  float voltaje3 = (float)25*analogRead(A3)/1023; //Función que mide el Voltaje
del output seleccionado
  float corrientemedio = 0; //Función que mide la corriente de in/out de la batería
  for(int i = 0; i < 1000; i++)
  {
    corrientemedio = corrientemedio + (.0264 * analogRead(A0) -13.51) / 10000;
    delay(1);
  }
}
```

```

    }
    float corrientemedia2 = 0; //Función que mide la corriente del output seleccionado
    for(int l = 0; l < 1000; l++)
    {
        corrientemedia2 = corrientemedia2 + (.0264 * analogRead(A2) -13.51) / 1000;
        delay(1);
    }
    float potencia1 = voltaje1 * corrientemedia0; //Función que mide la potencia
    in/out de las baterías
    float potencia2 = voltaje3 * corrientemedia2; //Función que mide la potencia
    del output seleccionado
    printMeasure("\n\nVoltaje de la Bateria: ", voltaje1, "V"); //Muestra las
    variables de las baterías
    printMeasure("Corriente Cargando(+)/Descargando (-): ", corrientemedia0, "A");
    printMeasure("Potencia Carga/Descarga: ", potencia1, "W");
    printMeasure("Voltaje Salida Seleccionada: ", voltaje3, "V"); //Muestra las
    variables del output seleccionado
    printMeasure("Corriente Salida Seleccionada: ", corrientemedia2, "A");
    printMeasure("Potencia Salida Seleccionada: ", potencia2, "W");
    estado_cargadescarga = cargando (corrientemedia0); //Esta función nos devuelve
    el estado de carga
    porcentaje_bateria = porcentaje (voltaje1); //Esta función nos devuelve el porcentaje
    de carga
    if (estado_cargadescarga == 0){ //La batería está desconectada, los Leds se apagan
    y se informa al usuario
        digitalWrite(led_rojo20,LOW);
        digitalWrite(led_amarillo40,LOW);
        digitalWrite(led_verde60,LOW);
        digitalWrite(led_verde80,LOW);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);
        Serial.print("No se detecta actividad, conecte algun dispositivo.");
        delay(500);
    }
    else if(estado_cargadescarga == 1){ //La batería se está cargando
        mostrar_porcentaje(porcentaje_bateria,1); //Se muestra el porcentaje con
    LEDs y mensaje al usuario
        delay (500);
        mostrar_porcentaje(porcentaje_bateria,0); //Se apaga el ultimo led encendido de
    forma que haya un efecto
    } //visual #####* ####* #####* ####* #####* ####* (#ON *OFF)
    else if (estado_cargadescarga == 2){ //La batería se está descargando
  
```

```
    mostrar_porcentaje(porcentaje_bateria,1); //Mientras se descarga los LEDs están
    siempre ON, y marcan el % restante mediante LEDs y Mensajes al usuario
  }
  delay (500);
}

//Aquí debajo comienzan las FUNCIONES AUXILIARES que permiten que todo el
código funcione correctamente
void printMeasure(String prefix, float value, String postfix){ //Esta función imprime
un valor electrico normalizado
  Serial.print(prefix);
  Serial.print(value, 3);
  Serial.println(postfix);
}

int cargando(float corrientecarga) { //Esta función devuelve el estado de carga al
programa, refiriéndose a:
  int estado_bateria; //0 apagado, 1 cargando batería, 2 descargando batería
  if (corrientecarga > 0){ //cargando, corriente positiva
    estado_bateria = 1;
  }
  else if (corrientecarga < 0){ //descargando, corriente negativa
    estado_bateria = 2;
  }
  else {
    estado_bateria=0; //sin usarse, sin corriente
  }
  return estado_bateria;
}

int porcentaje (float voltajecarga){ //Esta función devuelve el rango de porcentaje de
la batería
  int porcentaje; //Siendo 0 <20%, 1<40%, 2<60%, 3<80%, 4<100% y 5>100% (4,2V/c)
  if (voltajecarga < 22.7){
    porcentaje=0; }
  else if (voltajecarga >= 22.7 && voltajecarga < 23.2){
    porcentaje=1; }
  else if (voltajecarga >= 23.2 && voltajecarga < 23.7){
    porcentaje=2; }
  else if (voltajecarga >= 23.7 && voltajecarga < 24.2){
    porcentaje=3; }
  else if (voltajecarga >= 24.7 && voltajecarga < 25.2){
    porcentaje=4; }
  else{
```

```
        porcentaje=5;    }
    return porcentaje;
}
void mostrar_porcentaje (int porcentaje, int parpadeo){    //Esta función es la que
muestra el % al usuario tanto mediante
if (parpadeo == 1){    //señales lumínicas LEDs como mensajes en Pantalla cada LOOP
    if (porcentaje == 0){    //**** Siendo #ON y *OFF
        digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
        digitalWrite(led_amarillo40,LOW);
        digitalWrite(led_verde60,LOW);
        digitalWrite(led_verde80,LOW);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);
        Serial.print("Por favor, conecte el cargador, BATERIA BAJA!");
    }
    else if (porcentaje == 1){    //****
        digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
        digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
        digitalWrite(led_verde60,LOW);
        digitalWrite(led_verde80,LOW);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);
        Serial.print("Estado de la Bateria menor al 40%");
    }
    else if (porcentaje == 2){    //****
        digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
        digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
        digitalWrite(led_verde60,HIGH);
        digitalWrite(led_verde80,LOW);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);
        Serial.print("Estado de la Bateria menor al 60%");
    }
    else if (porcentaje == 3){    //*****
        digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
        digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
        digitalWrite(led_verde60,HIGH);
        digitalWrite(led_verde80,HIGH);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);

        Serial.print("Estado de la Bateria menor al 80%");
    }
    else if (porcentaje == 4){    //*****
        digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
```

```
digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
digitalWrite(led_verde60,HIGH);
digitalWrite(led_verde80,HIGH);
digitalWrite(led_azul100,HIGH);
Serial.print("Estado de la Bateria menor al 100%");
}
else if (porcentaje == 5){          ##### y mensaje de carga completada
digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
digitalWrite(led_verde60,HIGH);
digitalWrite(led_verde80,HIGH);
digitalWrite(led_azul100,HIGH);
Serial.print("Bateria Cargada, Puede desconectar el cargador.");
}
}
else { //Este else es el que crea el efecto dinámico de que se está cargando la batería
if (porcentaje == 0){          *****
digitalWrite(led_rojo20,LOW);
digitalWrite(led_amarillo40,LOW);
digitalWrite(led_verde60,LOW);
digitalWrite(led_verde80,LOW);
digitalWrite(led_azul100,LOW);
}
else if (porcentaje == 1){          *****
digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
digitalWrite(led_amarillo40,LOW);
digitalWrite(led_verde60,LOW);
digitalWrite(led_verde80,LOW);
digitalWrite(led_azul100,LOW);
}
else if (porcentaje == 2){          ####*
digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
digitalWrite(led_verde60,LOW);
digitalWrite(led_verde80,LOW);
digitalWrite(led_azul100,LOW);
}
else if (porcentaje == 3){          ####*
digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
digitalWrite(led_verde60,HIGH);
```

```

        digitalWrite(led_verde80,LOW);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);
    }
    else if (porcentaje == 4){          //#####*
        digitalWrite(led_rojo20,HIGH);
        digitalWrite(led_amarillo40,HIGH);
        digitalWrite(led_verde60,HIGH);
        digitalWrite(led_verde80,HIGH);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);
    }
    else if (porcentaje == 5){          //#####
        digitalWrite(led_rojo20,LOW);
        digitalWrite(led_amarillo40,LOW);
        digitalWrite(led_verde60,LOW);
        digitalWrite(led_verde80,LOW);
        digitalWrite(led_azul100,LOW);
    }
}
}
}

```

Por último, los resultados que se muestran tanto por pantalla como de forma lumínica mediante los leds son los siguientes.

```

        corrientemedio0 = corrientemedio0;
        delay(1);
    }
    float corrientemedio2 = 0;
    for(int l = 0; l < 1000; l++)
    {
        corrientemedio2 = corrientemedio2;
        delay(1);
    }
    float potencia1 = voltaje1 * corriente1;
    float potencia2 = voltaje3 * corriente3;

    printMeasure("\n\nVoltaje de la Bateria: ");
    printMeasure("Corriente Cargando(+)/Descargando (-): ");
    printMeasure("Potencia Carga/Descarga: ");

    printMeasure("Voltaje Salida Seleccionada: ");
    printMeasure("Corriente Salida Seleccionada: ");
    printMeasure("Potencia Salida Seleccionada: ");

    estado_cargadescarga = cargando (corriente1 > 0);
    porcentaje_bateria = porcentaje (voltaje1);

```

```

Voltaje de la Bateria: 23.803V
Corriente Cargando(+)/Descargando (-): 0.008A
Potencia Carga/Descarga: 0.182W
Voltaje Salida Seleccionada: 5.108V
Corriente Salida Seleccionada: -0.018A
Potencia Salida Seleccionada: -0.091W
Estado de la Bateria menor al 80%

Voltaje de la Bateria: 25.000V
Corriente Cargando(+)/Descargando (-): 0.008A
Potencia Carga/Descarga: 0.198W
Voltaje Salida Seleccionada: 5.108V
Corriente Salida Seleccionada: -0.019A
Potencia Salida Seleccionada: -0.097W
Estado de la Bateria menor al 100%

Voltaje de la Bateria: 25.000V
Corriente Cargando(+)/Descargando (-): 0.008A
Potencia Carga/Descarga: 0.198W
Voltaje Salida Seleccionada: 5.108V
Corriente Salida Seleccionada: -0.017A
Potencia Salida Seleccionada: -0.085W
Estado de la Bateria menor al 100%

```

Subido

El Sketch usa 7196 bytes (22%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 32256 bytes.  
 Las variables Globales usan 688 bytes (33%) de la memoria dinámica, dejando 1360 bytes para las variables

Fig. 5.10.6. Resultados obtenidos por pantalla

Test de funcionamiento en el laboratorio con los medidores conectados.

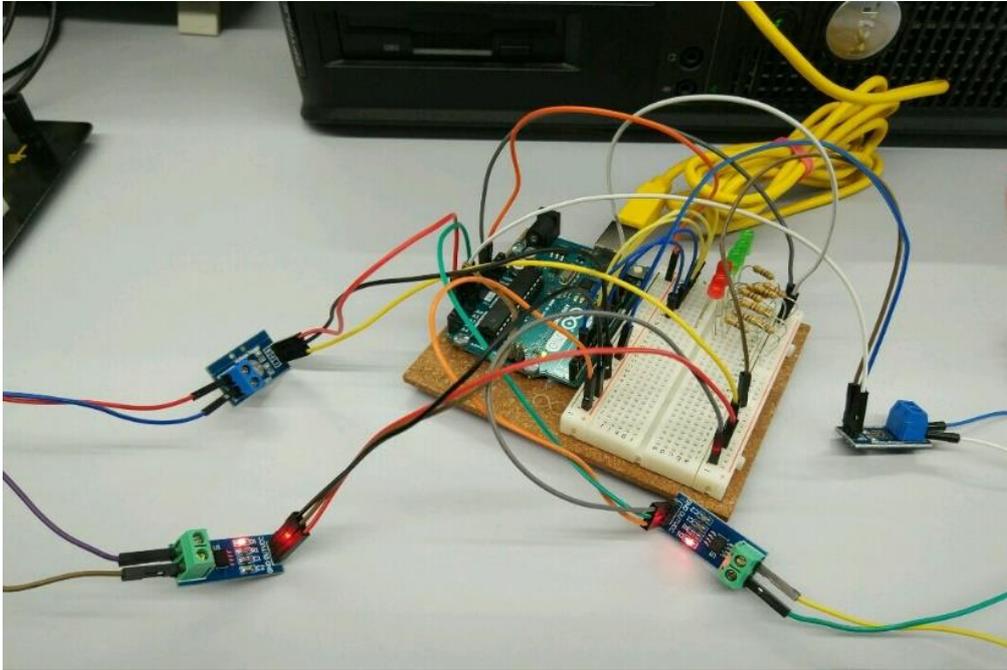


Fig. 5.10.7. Test del funcionamiento en el laboratorio con las fuentes de alimentación

Una vez enchufada la carga a dicho montaje procedemos a verificar la carga de la batería con los leds.

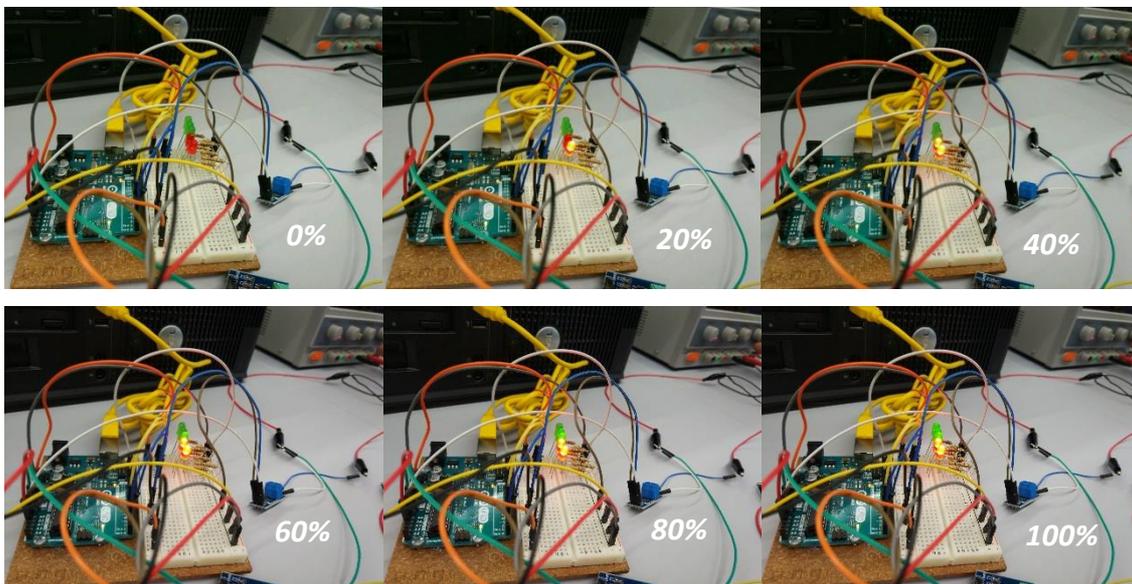


Fig. 5.10.8. Resultados de la iluminación correcta del porcentaje de carga mediante LEDs

No se puede apreciar muy bien, pero básicamente son los LEDs iluminados en consecuencia del porcentaje de carga en ese determinado instante, mediante la fuente del laboratorio se ha podido simular cualquier valor de voltaje al instante.

## 6. Metodología

### 6.1. Descripción de tareas y fases del proyecto

#### 1. Definición, especificaciones y requisitos

**Descripción:** Definir la base de tareas a realizar, ya que se tiene en cuenta que habrá cambios en las diferentes tareas a lo largo del proyecto, definir el diagrama de Gantt, y fijar todos los alcances del proyecto.

**Hitos:** Determinación de todos los requisitos funcionales.

**Entregables:** Mostrar al director del proyecto la idea general de los diferentes apartados que se realizarán durante el proyecto.

#### 2. Formación

**Descripción:** Formación acerca de los diferentes apartados que se trabajarán durante el proyecto, paneles fotovoltaicos, convertidores eléctricos y comprender el sistema completo de convertidores eléctricos para desarrollar una instalación de energía solar tanto para alterna monofásica como para alterna trifásica.

**Hitos:** Adquirir los conocimientos necesarios para ser capaz de desarrollar el proyecto.

**Entregables:** No aplica.

#### 3. Estado del Arte

**Descripción:** Se debe documentar todo lo aprendido durante la formación acerca de paneles solares, convertidores eléctricos, análisis matemático, y documentación para el desarrollo de una instalación de energía solar tanto para alterna monofásica como para alterna trifásica.

**Hitos:** Documentar todo lo mencionado en descripción en el tiempo planeado.

**Entregables:** Informe relativo al estado del arte, el cual se incluye como capítulo en este trabajo fin de grado.

#### 4. Software Arduino

**Descripción:** Programar Arduino para que desarrolle las diferentes funciones que se plantean en este TFG.

**Hitos:** Desarrollar los tres programas que se plantean al inicio del proyecto.

**Entregables:** Informe relativo a los programas de Arduino, que se incluyen en este trabajo fin de grado.

#### 5. Prototipo y Maqueta

**Descripción:** Desarrollar todos los convertidores eléctricos que se plantean en este documento físicamente, y realizar una maqueta del prototipo de sistema de convertidor de energía solar a tensión alterna de 230V.

**Hitos:** Conseguir desarrollar todos los convertidores a tiempo.

**Entregables:** Mostrar al director del proyecto los prototipos y maquetas realizadas.

#### 6. Análisis y resultados

---

Descripción: Documentar los circuitos y cálculos realizados para el desarrollo de todos los prototipos y maquetas, y obtener gráficas de salida de onda, y fotos y videos del correcto funcionamiento de todos los dispositivos.

Hitos: Documentar a tiempo todos los prototipos y maquetas que se han desarrollado.

Entregables: Informe relativo a los prototipos desarrollados que se incluyen en este trabajo fin de grado.

## 7. Documentación

Descripción: Documentar todas las tareas realizadas en este trabajo de fin de grado, que se irán documentando a medida que se vayan cumpliendo las tareas anteriores.

Hitos: Documentar el trabajo de fin de grado.

Entregables: Memoria del trabajo de fin de grado.

## 6.2. Diagrama de Gantt

El siguiente diagrama de Gantt muestra el tiempo de dedicación previsto para las diferentes tareas que se han llevado a cabo en este trabajo de fin de grado. No se han logrado desarrollar todas las tareas previstas debido a que el proyecto era demasiado extenso desde el comienzo. Las tareas que no se han logrado desarrollar son:

- Instrumentación del Boost con Arduino: por falta de tiempo.
- Baterías Li-Ion 6S2P con BMS: Se decidió sustituir esta batería por una batería de plomo de 12 V, debido al aumento de complejidad y potencia en todos los circuitos.

Al comenzar el proyecto y definir que el proyecto iría sobre convertidores eléctricos, el primer paso que se realizó fue el cálculo de las baterías Li-Ion 6S2P y el BMS "Battery Management System" que se necesitaban. Se compraron en china, mientras venían, se desarrolló el software de Arduino que medía el porcentaje de la batería empleando como "batería" la fuente de alimentación del laboratorio. Al finalizar el código, por suerte, las baterías no habían llegado, por lo que se comenzó el desarrollo del boost, y se llegó a la conclusión de que utilizar baterías de 22,2 V nominales, iba a imposibilitar el desarrollo del resto de convertidores eléctricos por el aumento en la potencia y complejidad de todos los dispositivos, por esta razón, se decidió sustituir la batería Li-Ion 6S2P con BMS, por una sola batería de plomo de 12 V, a pesar de que el código ya se había desarrollado.

### Estudio teórico práctico de los convertidores eléctricos y sistemas fotovoltaicos

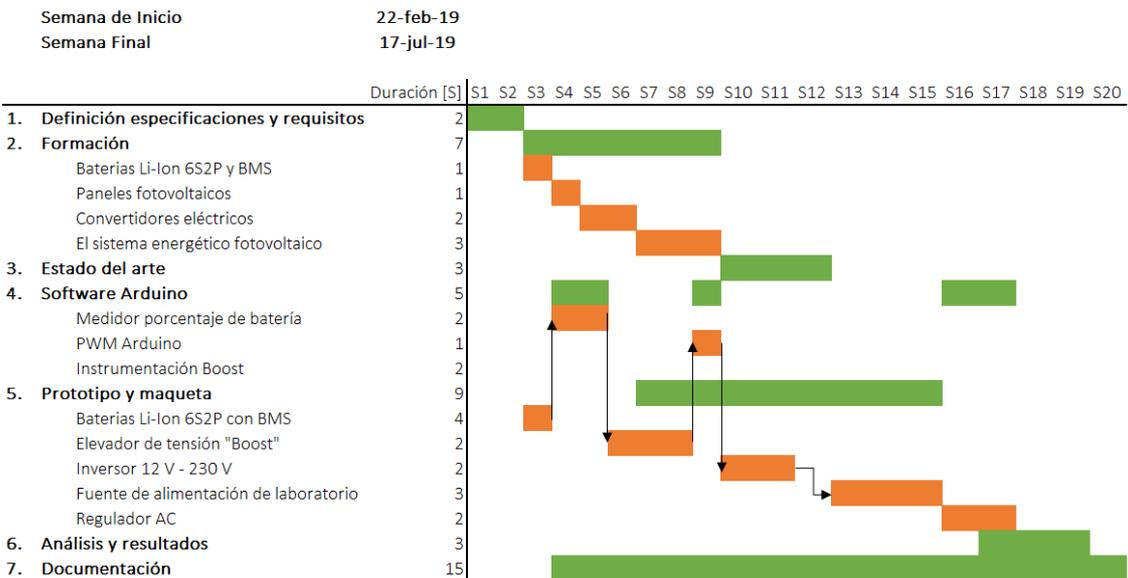


Diagrama de Gantt

## 7. Aspectos económicos

### 7.1. Desglose de gastos

Para realizar este apartado, se supondrá que el alumno es un trabajador de una empresa en la que trabaja diez horas a la semana durante las veinte semanas que dura el proyecto. Por lo tanto, el desglose de gastos presentado es el supuesto a pagar en el caso de que el proyecto fuese realizado por una empresa.

#### Horas internas

Horas Internas	Coste Unitario	nº de horas	Coste Total
de Ingeniería			
de diseño	35 €/hora	100	3.500,00 €
de fabricación	35 €/hora	70	2.450,00 €
de ensayos	35 €/hora	30	1.050,00 €
de Tutor o Director del proyecto	50 €/hora	7	350,00 €
		<b>Subtotal</b>	<b>7.350,00 €</b>

Tabla 1. Horas internas

#### Amortizaciones

Concepto	Coste	Vida útil [h]	Horas de uso	Coste Total
Maquinaria de laboratorio				
Soldador	80,00 €	17000	30	0,14 €
Fuente de alimentación	300,00 €	17000	10	0,18 €
Osciloscopio	600,00 €	17000	5	0,18 €
Taladro vertical	300,00 €	17000	4	0,07 €
Herramientas taller	200,00 €	17000	10	0,12 €
Licencias de software	150,00 €	5000	100	3,00 €
Ordenador	550,00 €	8500	200	12,94 €
			<b>Subtotal</b>	<b>16,62 €</b>

Tabla 2. Amortizaciones

### Gastos

Concepto	Coste	Unidades	Coste Total
<b>Componentes Independientes</b>			
Paneles solares	12,00 €	1	12,00 €
Bateria	25,00 €	1	25,00 €
Arduino UNO	50,00 €	1	50,00 €
Instrumentación H/W Arduino	3,00 €	8	24,00 €
Transformador (230V-12+0+12) Inv.	50,00 €	1	50,00 €
Transformador (230V-24V) F. Alim.	50,00 €	1	50,00 €
<b>Componentes Electronicos</b>			
Elevador de tensión	12,00 €	1	12,00 €
Inversor	10,00 €	1	10,00 €
Regulador AC	12,00 €	1	12,00 €
Fuente de Alimentacion Lab.	50,00 €	1	50,00 €
		<b>Subtotal</b>	<b>258,00 €</b>

Tabla 3. Gastos

### Resumen

Concepto	Coste Total
Horas Internas	7.350,00 €
Amortizaciones	16,62 €
Gastos	258,00 €
	<b>Subtotal</b>
	<b>7.624,62 €</b>
Costes Indirectos (5%)	381,23 €
	<b>TOTAL</b>
	<b>8.005,85 €</b>

Tabla 4. Resumen del desglose de gastos

## 8. Conclusiones

En este trabajo de fin de grado se ha tratado la comprensión y funcionamiento de todos los convertidores eléctricos, de forma que se puedan emplear estos conocimientos para desarrollar un sistema de generación eléctrica fotovoltaica. Tras comprender esto en el apartado historia del arte, se han desarrollado varios prototipos de convertidores eléctricos, y también una maqueta de un sistema de convertidores con panel fotovoltaico de 12 V, transformados a tensión alterna doméstica de 230 V. El objetivo, ha sido que de la tensión de 12 V del panel solar se convierta a tensión alterna doméstica de 230 V, y que, de esta, se obtenga tensión Alterna regulada y Continua regulada en dos salidas independientes, como se puede ver en la siguiente figura.

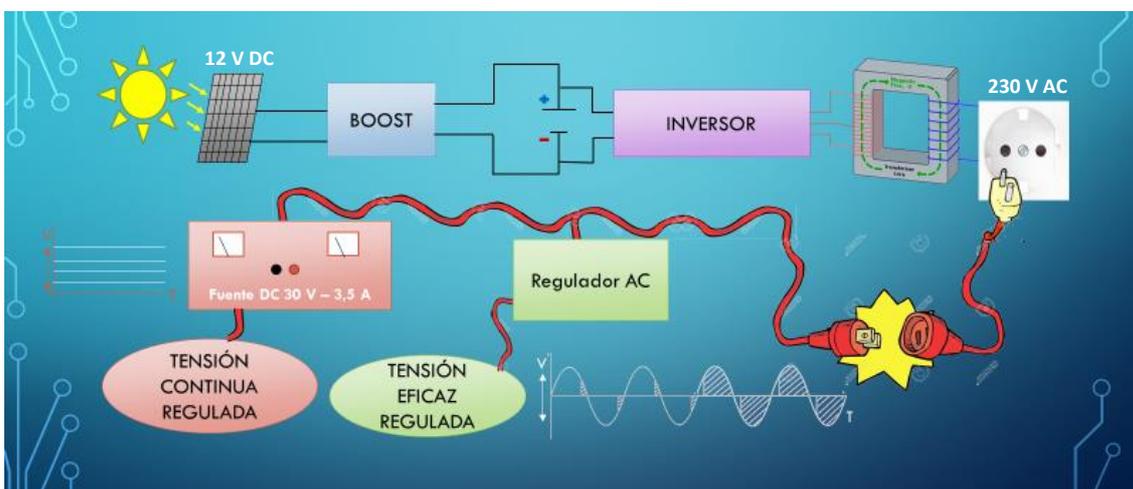


Fig. 7.1.1. Diagrama de bloques del sistema de convertidores completo que se ha desarrollado

Se han estudiado diferentes diseños de circuitos, consultado y comprendido los datasheets de los componentes empleados, y se han desarrollado los que se han considerado más eficientes, o que más aportación tenían al proyecto, como por ejemplo emplear Arduino para la generación del PWM en lugar de un circuito más sencillo con un timer 555.

Por último, el proceso de diseño, montaje y redacción de los prototipos y la maqueta ha sido un trabajo arduo, pero ha sido un orgullo tras ver que todas las partes del proyecto han salido como se esperaba y que los resultados obtenidos cumplieran con todas las expectativas.

## 9. Bibliografía

- [1] eruoparl.europa.eu – Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector: Última visita: 03/05/2019 Url: <http://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>
- [2] oxfamintermon.org - Los 7 problemas del medio ambiente más graves, última visita: 03/05/2019 Url: <https://blog.oxfamintermon.org/los-7-problemas-del-medio-ambiente-mas-graves/>
- [3] blog.oxfamintermon.org – 5 problemas ambientales actuales, última visita: 03/05/2019 Url: <https://blog.oxfamintermon.org/5-problemas-ambientales-actuales/>
- [4] energiaysociedad.es – Regulación española de las energías renovables, última visita: 04/05/2019, Url: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-5-regulacion-espanola-de-las-energias-renovables/>
- [5] ecogiaverde.com – Cuales son las fuentes de energía más utilizadas en el mundo, última visita: 03/06/2019 Url: <https://www.ecogiaverde.com/cuales-son-las-fuentes-de-energia-mas-utilizadas-en-el-mundo-1426.html>
- [6] factorenergia.com – Energías renovables, características, tipos y nuevos retos Url: <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>
- [7] energías-renovables.com – Inversiones en energías renovables – última visita: 04/05/2019 – Url: <https://www.energias-renovables.com/panorama/esto-es-lo-que-invirtio-cada-pais-20180124>
- [8] researchgate.net – evolución histórica de la procedencia de la electricidad en Twh [https://www.researchgate.net/figure/Figura-61-Evolucion-del-consumo-de-energia-en-los-diferentes-sectores-industriales-a\\_fig1\\_328272298](https://www.researchgate.net/figure/Figura-61-Evolucion-del-consumo-de-energia-en-los-diferentes-sectores-industriales-a_fig1_328272298)
- [9] sc.ehu.es – el efecto fotoeléctrico, última visita: 20/05/2019 – Url: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>
- [10] itson.mx – Artículo científico del estudio del punto de máxima potencia en paneles solares – última visita: 20/06/2019 Url: [https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf\\_estudio\\_del\\_algoritmo\\_de\\_segui\\_miento\\_de\\_punto\\_de\\_maxima\\_potencia\\_perturbar\\_y\\_observar.pdf](https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf_estudio_del_algoritmo_de_segui_miento_de_punto_de_maxima_potencia_perturbar_y_observar.pdf)
- [11] ifent.org – potencia calorífica y calor. Ley de joule. – última visita: 17/05/2019 Url: <http://www.ifent.org/lecciones/electrodinamica/eldinami42.asp>
- [12] syzcominsa.pe – Efectos de los armónicos, última visita: 6/06/2019 – Url: <https://syzcominsa.pe/blog/cuales-son-los-efectos-de-los-armonicos>
- [13] mheducation.es – Estudio de rectificadores monofásicos – Última visita: 18/06/2019 - Url: <http://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171624.pdf>
- [14] labc.usb.ve – filtrado de ondas para rectificadores de doble onda – Última visita: 18/06/2019 - Url: <http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/EC1177/Contenido/clase5-2.pdf>

- [15] issuu.com – rectificadores trifásicos – última visita: 02/07/2019 - Url: [https://issuu.com/jaguilarpena/docs/electronica\\_potencia1\\_2/87](https://issuu.com/jaguilarpena/docs/electronica_potencia1_2/87)
- [16] itq.edu.mx – Estudio teórico del desarrollo y cálculos de señales PPM y PWM – última visita 10/06/2019 - Url: [http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos\\_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDF1202\\_Comm\\_Digitales/5\\_PAM-PPM-PWM.pdf](http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDF1202_Comm_Digitales/5_PAM-PPM-PWM.pdf)
- [17] gte.us.es – Estudio teórico de los convertidores dc-dc – última visita: 20/06/2019 - Url: [http://www.gte.us.es/~leopoldo/Store/tsp\\_15.pdf](http://www.gte.us.es/~leopoldo/Store/tsp_15.pdf)
- [18] uv.es – Estudio inversores monofásicos universidad de valencia – última visita: 20/06/2019 - Url: [https://www.uv.es/emaset/iep00/temas/IEP11\\_0607.pdf](https://www.uv.es/emaset/iep00/temas/IEP11_0607.pdf)
- [19] ocw.uc3m.es – Estudio de inversores trifásicos por la universidad rey juan Carlos 3 de Madrid – Última visita: 12/06/2019 - Url: <http://ocw.uc3m.es/tecnologia-electronica/electronica-de-potencia/material-de-clase-1/MC-F-006.pdf>
- [20] areatecnologia.com – Estudio teórico de tiristores y triacs – ultima visita: 28/06/2019 - Url: <https://www.areatecnologia.com/electronica/triac.html>
- [21] dfs.uib.es – Teoría de transformadores U. de Oviedo – Última visita 28/6/2019 - Url: [http://dfs.uib.es/GTE/education/industrial/con\\_maq\\_electricas/teoria/Teoria%20Oviedo/Primer%20Parcial/Presentaciones%20en%20formato%20PDF/Tema4.pdf](http://dfs.uib.es/GTE/education/industrial/con_maq_electricas/teoria/Teoria%20Oviedo/Primer%20Parcial/Presentaciones%20en%20formato%20PDF/Tema4.pdf)
- [22] blogs.publico.es - El sistema solar fotovoltaico – Ultima visita: 20/06/2019 - Url: <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2017/01/27/posibilidades-y-dificultades-para-el-autoconsumo-de-energia-electrica/>
- [23] mheducation.es – Componentes de una instalación fotovoltaica – ultima visita: 20/06/2019 - Url: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>
- [24] api.eoi.es – Trabajo de fin de master en energías renovables y paneles fotovoltaicos -Ultima visita: 20/06/2019 - Url: [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf)
- [25] uvadoc.uva.es - Reguladores de carga, Universidad de Valladolid – última visita: 20/06/2019 - Url: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/14110/TFG-P-303.pdf;jsessionid=BBABD9F9CF96040309534BB99C087B76?sequence=1>
- [26] repository.upb.edu.co – Estudio de curvas de descarga por tecnología de baterías – Ultima visita: 23/06/2019 - Url: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1536/MANUAL%20DE%20BATERIAS%20PARA%20BATERIAS%20DE%20BATERIAS.pdf>
- [27] electronica y ciencia.blogspot.com – Multivibrador Astable – Última visita: 02/07/2019 - Url: <http://electronicyciencia.blogspot.com/2010/04/multivibrador-astable-transistores.html>

## 10. Anexos

# SR520 THRU SR5100

5.0 AMP SCHOTTKY BARRIER RECTIFIERS





**FEATURES**

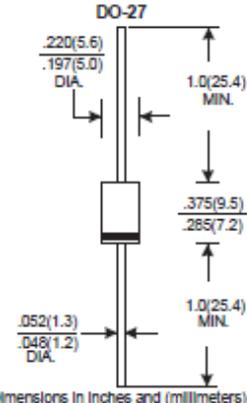
- \* Low forward voltage drop
- \* High current capability
- \* High reliability
- \* High surge current capability
- \* Epitaxial construction

**MECHANICAL DATA**

- \* Case: Molded plastic
- \* Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant
- \* Lead: Axial leads, solderable per MIL-STD-202, method 208 guaranteed
- \* Polarity: Color band denotes cathode end
- \* Mounting position: Any
- \* Weight: 1.10 grams

**VOLTAGE RANGE**  
20 to 100 Volts

**CURRENT**  
5.0 Amperes



Dimensions in Inches and (millimeters)

**MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Rating 25°C ambient temperature unless otherwise specified.  
 Single phase half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
 For capacitive load, derate current by 20%.

TYPE NUMBER	SR520	SR530	SR540	SR550	SR560	SR580	SR5100	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	20	30	40	50	60	80	100	V
Maximum RMS Voltage	14	21	28	35	42	56	70	V
Maximum DC Blocking Voltage	20	30	40	50	60	80	100	V
Maximum Average Forward Rectified Current See Fig. 1	5.0							A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)	150							A
Maximum Instantaneous Forward Voltage at 5.0A	0.55		0.70		0.85			V
Maximum DC Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage	Ta=25°C			5.0				mA
Typical Junction Capacitance (Note 1)	Ta=100°C			50				mA
Typical Thermal Resistance RθJA (Note 2)	380							pF
Operating Temperature Range Tj	10							°C/W
Storage Temperature Range Tstg	-65 — +125			-65 — +150				°C
Storage Temperature Range Tstg	-65 — +150							°C

NOTES:  
 1. Measured at 1MHz and applied reverse voltage of 4.0V D.C.  
 2. Thermal Resistance Junction to Ambient Vertical PC Board Mounting 0.5"(12.7mm) Lead Length.

*Datasheet 1. Diodo Schottky para el elevador de tensión*

**INCHANGE Semiconductor**

**isc Product Specification**

**isc N-Channel MOSFET Transistor**

**IRFZ44N**

**FEATURES**

- Drain Current  $-I_D=49A@ T_C=25^\circ C$
- Drain Source Voltage-  
:  $V_{DS}= 55V(\text{Min})$
- Static Drain-Source On-Resistance  
:  $R_{DS(on)} = 0.032 \Omega (\text{Max})$
- Fast Switching

**DESCRIPTION**

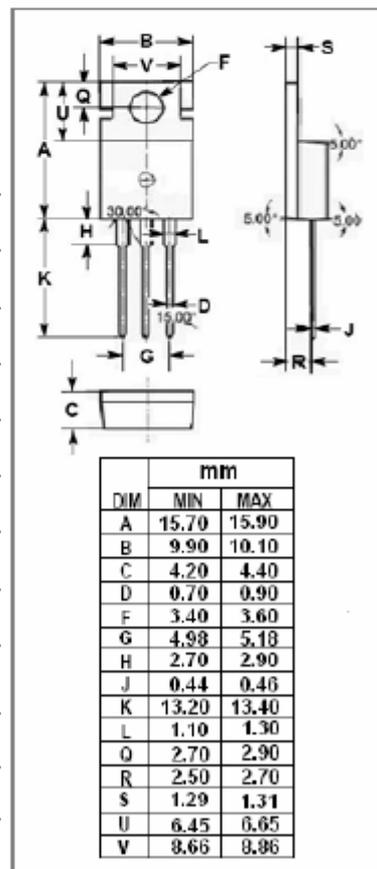
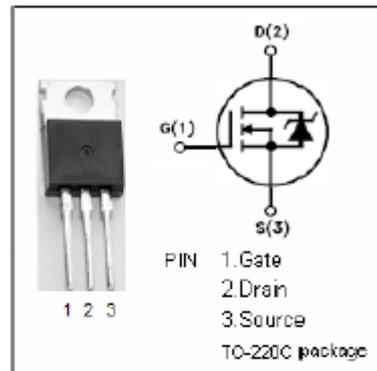
- Designed for low voltage, high speed switching applications in power supplies, converters and power motor controls, these devices are particularly well suited for bridge circuits where diode speed and commutating safe operating areas are critical and offer additional safety margin against unexpected voltage transients.

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS( $T_a=25^\circ C$ )**

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$V_{DS}$	Drain-Source Voltage	55	V
$V_{GS}$	Gate-Source Voltage-Continuous	$\pm 20$	V
$I_D$	Drain Current-Continuous	49	A
$I_{DM}$	Drain Current-Single Pulse ( $t_p \leq 10 \mu s$ )	160	A
$P_D$	Total Dissipation @ $T_C=25^\circ C$	94	W
$T_J$	Max. Operating Junction Temperature	175	$^\circ C$
$T_{stg}$	Storage Temperature	-55~175	$^\circ C$

**THERMAL CHARACTERISTICS**

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNIT
$R_{th(j-c)}$	Thermal Resistance, Junction to Case	1.5	$^\circ C/W$
$R_{th(j-a)}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	62	$^\circ C/W$



**INCHANGE Semiconductor**

**isc Product Specification**

**isc N-Channel MOSFET Transistor**

**IRFZ44N**

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

$T_C=25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	MAX	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS}=0; I_D=0.25\text{mA}$	55		V
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS}=V_{GS}; I_D=0.25\text{mA}$	2	4	V
$R_{DS(on)}$	Drain-Source On-Resistance	$V_{GS}=10\text{V}; I_D=25\text{A}$		0.032	$\Omega$
$I_{GSS}$	Gate-Body Leakage Current	$V_{GS}=\pm 20\text{V}; V_{DS}=0$		$\pm 100$	nA
$I_{DSS}$	Zero Gate Voltage Drain Current	$V_{DS}=55\text{V}; V_{GS}=0$ $V_{DS}=55\text{V}; V_{GS}=0; T_J=150^{\circ}\text{C}$		25 250	$\mu\text{A}$
$V_{SD}$	Forward On-Voltage	$I_S=25\text{A}; V_{GS}=0$		1.3	V

## TIP35A, TIP35B, TIP35C (NPN); TIP36A, TIP36B, TIP36C (PNP)

### Complementary Silicon High-Power Transistors

Designed for general-purpose power amplifier and switching applications.

#### Features

- 25 A Collector Current
- Low Leakage Current –  
 $I_{CEO} = 1.0 \text{ mA @ } 30 \text{ and } 60 \text{ V}$
- Excellent DC Gain –  
 $h_{FE} = 40 \text{ Typ @ } 15 \text{ A}$
- High Current Gain Bandwidth Product –  
 $|h_{fe}| = 3.0 \text{ min @ } I_C = 1.0 \text{ A, } f = 1.0 \text{ MHz}$
- These are Pb-Free Devices\*

#### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	TIP35A TIP36A	TIP35B TIP36B	TIP35C TIP36C	Unit
Collector – Emitter Voltage	$V_{CEO}$	60	80	100	Vdc
Collector – Base Voltage	$V_{CB}$	60	80	100	Vdc
Emitter – Base Voltage	$V_{EB}$	5.0			Vdc
Collector Current – Continuous – Peak (Note 1)	$I_C$	25 40			Adc
Base Current – Continuous	$I_B$	5.0			Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	125			W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	–65 to +150			$^\circ\text{C}$
Unclamped Inductive Load	$E_{SB}$	90			mJ

#### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	1.0	$^\circ\text{C/W}$
Junction-To-Free-Air Thermal Resistance	$R_{\theta JA}$	35.7	$^\circ\text{C/W}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

1. Pulse Test: Pulse Width = 10 ms, Duty Cycle  $\leq 10\%$ .

\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

25 AMPERE  
 COMPLEMENTARY SILICON  
 POWER TRANSISTORS  
 60–100 VOLTS, 125 WATTS



SOT-93 (TO-218)  
 CASE 340D  
 STYLE 1



TO-247  
 CASE 340L  
 STYLE 3

**NOTE:** Effective June 2012 this device will be available only in the TO-247 package. Reference FPCN# 16827.

#### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 2 of this data sheet.



## BTA/BTB16 and T16 Series

SNUBBERLESS™ , LOGIC LEVEL & STANDARD

16A TRIACs

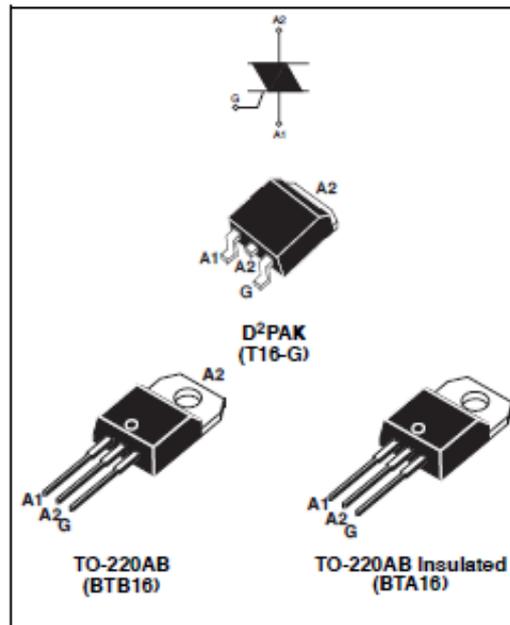
### MAIN FEATURES:

Symbol	Value	Unit
$I_{T(RMS)}$	16	A
$V_{DRM}/V_{RRM}$	600, 700 and 800	V
$I_{GT} (Q_1)$	10 to 50	mA

### DESCRIPTION

Available either in through-hole or surface-mount packages, the BTA/BTB16 and T16 triac series is suitable for general purpose AC switching. They can be used as an ON/OFF function in applications such as static relays, heating regulation, induction motor starting circuits... or for phase control operation in light dimmers, motor speed controllers, ...

The snubberless versions (BTA/BTB...W and T16 series) are specially recommended for use on inductive loads, thanks to their high commutation performances. By using an internal ceramic pad, the BTA series provides voltage insulated tab (rated at 2500V RMS) complying with UL standards (File ref.: E81734).



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit		
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current (full sine wave)	D <sup>2</sup> PAK	16	A	
		TO-220AB			
		TO-220AB Ins.			
$I_{TSM}$	Non repetitive surge peak on-state current (full cycle, $T_j$ initial = 25°C)	F = 60 Hz	t = 16.7 ms	168	A
		F = 50 Hz	t = 20 ms		
$i^2t$	$i^2t$ Value for fusing	tp = 10 ms		144	A <sup>2</sup> s
dI/dt	Critical rate of rise of on-state current $I_G = 2 \times I_{GT} \cdot tr \leq 100$ ns	F = 120 Hz	$T_j = 125^\circ\text{C}$	50	A/ $\mu\text{s}$
$V_{DSM}/V_{RSM}$	Non repetitive surge peak off-state voltage	tp = 10 ms	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_{DRM}/V_{RRM} + 100$	V
$I_{GM}$	Peak gate current	tp = 20 $\mu\text{s}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$	4	A
$P_{G(AV)}$	Average gate power dissipation	$T_j = 125^\circ\text{C}$		1	W
$T_{stg}$	Storage junction temperature range			- 40 to + 150	°C
$T_j$	Operating junction temperature range			- 40 to + 125	

October 2002 - Ed: 6A

1/7

Datasheet 4. Triac del regulador de tension alterna

## LM317 3-Terminal Adjustable Regulator

### 1 Features

- Output Voltage Range Adjustable From 1.25 V to 37 V
- Output Current Greater Than 1.5 A
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Thermal Overload Protection
- Output Safe-Area Compensation

### 2 Applications

- ATCA Solutions
- DLP: 3D Biometrics, Hyperspectral Imaging, Optical Networking, and Spectroscopy
- DVR and DVS
- Desktop PC
- Digital Signage and Still Camera
- ECG Electrocardiogram
- EV HEV Charger: Level 1, 2, and 3
- Electronic Shelf Label
- Energy Harvesting
- Ethernet Switch
- Femto Base Station
- Fingerprint and Iris Biometrics
- HVAC: Heating, Ventilating, and Air Conditioning
- High-Speed Data Acquisition and Generation
- Hydraulic Valve
- IP Phone: Wired and Wireless
- Intelligent Occupancy Sensing
- Motor Control: Brushed DC, Brushless DC, Low-Voltage, Permanent Magnet, and Stepper Motor
- Point-to-Point Microwave Backhaul
- Power Bank Solutions
- Power Line Communication Modem
- Power Over Ethernet (PoE)
- Power Quality Meter
- Power Substation Control
- Private Branch Exchange (PBX)
- Programmable Logic Controller
- RFID Reader
- Refrigerator
- Signal or Waveform Generator
- Software Defined Radio (SDR)
- Washing Machine: High-End and Low-End
- X-ray: Baggage Scanner, Medical, and Dental

### 3 Description

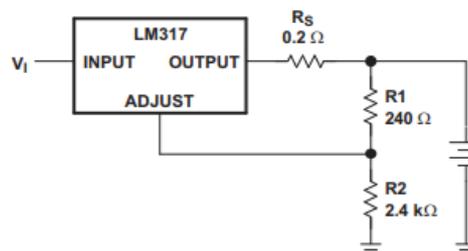
The LM317 device is an adjustable three-terminal positive-voltage regulator capable of supplying more than 1.5 A over an output-voltage range of 1.25 V to 37 V. It requires only two external resistors to set the output voltage. The device features a typical line regulation of 0.01% and typical load regulation of 0.1%. It includes current limiting, thermal overload protection, and safe operating area protection. Overload protection remains functional even if the ADJUST terminal is disconnected.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM317DCY	SOT-223 (4)	6.50 mm × 3.50 mm
LM317KCS	TO-220 (3)	10.16 mm × 9.15 mm
LM317KCT	TO-220 (3)	10.16 mm × 8.59 mm
LM317KTT	TO-263 (3)	10.16 mm × 9.01 mm

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

#### Battery-Charger Circuit



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

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

*Datasheet 5. Regulador de tensión de la fuente de alimentación del laboratorio*

## 2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

Preferred Device

### Complementary Silicon Power Transistors

Complementary silicon power transistors are designed for general-purpose switching and amplifier applications.

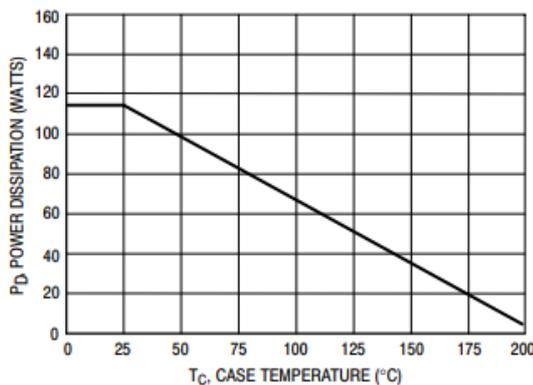
#### Features

- DC Current Gain -  $h_{FE} = 20-70 @ I_C = 4 \text{ Adc}$
- Collector-Emitter Saturation Voltage -  $V_{CE(sat)} = 1.1 \text{ Vdc (Max) @ } I_C = 4 \text{ Adc}$
- Excellent Safe Operating Area
- Pb-Free Packages are Available\*

#### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	60	Vdc
Collector-Emitter Voltage	$V_{CER}$	70	Vdc
Collector-Base Voltage	$V_{CB}$	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EB}$	7	Vdc
Collector Current - Continuous	$I_C$	15	A dc
Base Current	$I_B$	7	A dc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate Above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	115 0.657	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.



\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

15 AMPERE  
 POWER TRANSISTORS  
 COMPLEMENTARY SILICON  
 60 VOLTS, 115 WATTS



TO-204AA (TO-3)  
 CASE 1-07  
 STYLE 1

#### MARKING DIAGRAM



xxxx55 = Device Code  
 xxxx = 2N30 or MJ20  
 G = Pb-Free Package  
 A = Location Code  
 YY = Year  
 WW = Work Week  
 MEX = Country of Origin

#### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
2N3055	TO-204AA	100 Units / Tray
2N3055G	TO-204AA (Pb-Free)	100 Units / Tray
MJ2955	TO-204AA	100 Units / Tray
MJ2955G	TO-204AA (Pb-Free)	100 Units / Tray

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.