



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA PARA
UNA TURBINA EÓLICA

Autor: Marcos Rived Martín

Director: Katherine O´Kane

Madrid

Junio 2016

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. **MARCOS RIVED MARTÍN**

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA PARA UNA TURBINA EÓLICA**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 9 de JUNIO de 2016.

ACEPTA



Fdo

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:
SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA PARA UNA TURBINA EÓLICA
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **2015/2016** es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni
parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: MARCOS RIVED MARTÍN

Fecha: 09/06/2016



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: KATHERINE O'KANE

Fecha: 30/04/2016

Katherine M. O'Kane

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.: Fecha://

SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA PARA UNA TURBINA EÓLICA

Autor: Rived Martín, Marcos

Director: Katherine O'Kane

Entidad colaboradora: University of Illinois

RESUMEN DEL PROYECTO

1-. INTRODUCCIÓN

El proyecto se basa fundamentalmente en el diseño de una caja de baterías dotada de un sistema de electrónica de potencia que permita el uso de energía generada en una turbina eólica de eje vertical. La aplicación fundamental que este diseño tendrá será la de proveer, a nivel doméstico, una sistema eficiente que permita emplear la energía del viento para cubrir las necesidades energéticas del hogar, tales como la carga de aparatos eléctricos, la alimentación de calefactores, sistemas de iluminación etc.

El diseño constará de dos módulos. En primer lugar el módulo de carga que transformará la energía generada por la turbina eólica en energía almacenada en una batería de plomo ácido para su posterior uso. En segundo lugar contará con el módulo de descarga. Este módulo hará las veces de la interacción con el usuario. Estará dotado de portabilidad y podrá ser desprendido del eje central, siendo, además, de gran utilidad cuando se requiera de necesidades energéticas lejos de una fuente de alimentación como en este caso es la turbina.

Todo ello se diseñará siguiendo unas pautas de eficiencia y coste que permitan aprovechar al máximo los recursos disponibles y lograr resultados beneficiosos a nivel global. Este proyecto se considera el primer avance para lograr extender la energía eólica en los hogares como ya ha venido haciendo la energía solar en los últimos años. La inversión inicial podrá ser recuperada a largo plazo con la inclusión de un sistema de acople a la red general que permita enviar energía sobrante a la red a cambio de una retribución pactada con las compañías eléctricas oportunas.

2-. METODOLOGÍA

La turbina estará formada por una máquina síncrona de dos polos que, por razones de seguridad, girará a 240 rpm constantes independientemente de las condiciones meteorológicas. Esta velocidad producirá una diferencia de tensión de 9 Voltios entre tierra y cada una de las tres líneas con las que contará la salida trifásica de la propia turbina. Esa diferencia de potencial será aprovechada por el sistema de electrónica de potencia para alimentar dispositivos electrónicos, tales como calefactores, móviles, lámparas etc.

El sistema electrónico de potencia contará con elementos que transformen la tensión trifásica de salida del generador en tensión continua y a continuación, la adecúen conforme a la tensión nominal que se requiera en cada caso. Para este proceso se diseñarán los siguientes elementos: Un rectificador

trifásico, un convertor DC-DC, un sistema de control para cargar la batería, un cargador de batería, un inversor y varios dispositivos que conformen la interacción con el usuario.

El rectificador trifásico transformará los 9 V entre fase y tierra del generador en, aproximadamente, 21 V de tensión continua con rizado. Los 21 V de tensión continua supondrán la entrada al convertor DC-DC que, mediante un circuito con interruptores junto con un filtro, logrará una tensión de 15 V de continua fija para la carga de la batería.

Por otro lado, para mantener los 15 V de continua, cuya procedencia se acaba de explicar, se implementará un sistema de control basado en lenguaje *Arduino* de forma iterativa que muestree la tensión de salida en cada instante y corrija el ciclo de los interruptores para lograr 15 V de forma constante.

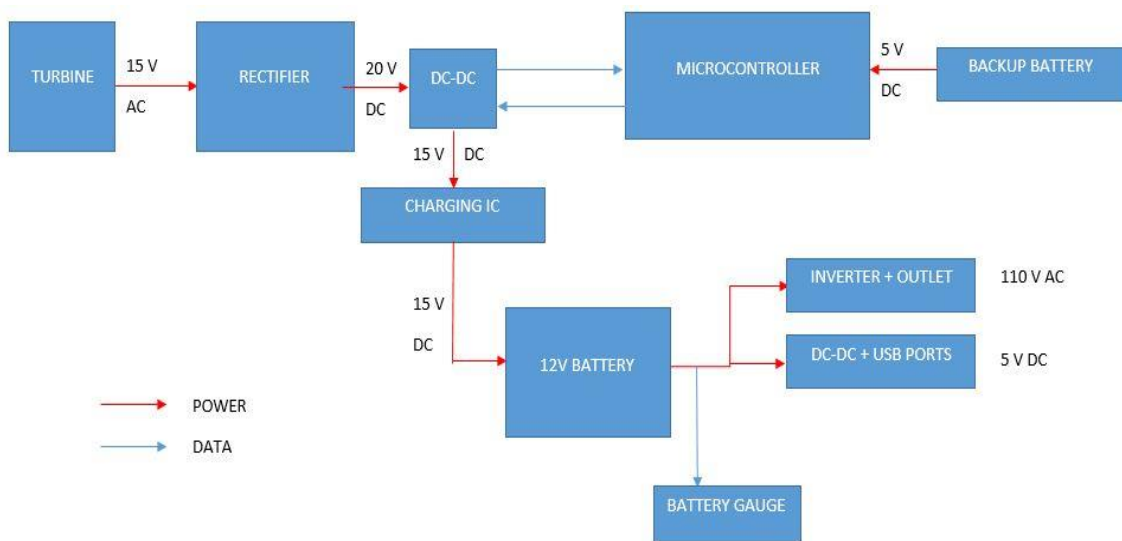


Figura 1: Diagrama de bloques

Una vez que se asumen 15 V de continua a la salida del convertor de forma constante, habrá que modificarlos ligeramente en función de la carga de la batería en cada instante de forma que se ajuste a las necesidades de la misma. Para ello se introducirá un cargador de batería que realice una doble función: Primeramente, deberá adecuar la tensión a la que la batería carga de forma que para cada nivel de carga, la tensión sea la precisa. En segundo lugar, deberá estar dotado de un limitador de corriente que cumpla con las especificaciones de la batería y no sobrepase los límites máximos en el amperaje de la misma.

En el lado de descarga del proyecto, se interactuará con el usuario para suplir ciertas necesidades, tales como la carga de dispositivos electrónicos; la alimentación de elementos de iluminación, calefactores etc.; medida de la carga de la batería... Para las salidas que requieran 110 V, 60 Hz se construirá un inversor que transforme los 12 V que aporta la batería en 110 V, 60 Hz de tensión alterna. Para ello se integrará un transformador con núcleo de hierro que eleve la tensión desde los 12 V de tensión alterna aportados por el inversor.

Para el resto de elementos se optará por adquirirlos desde catálogos comerciales para mejorar las prestaciones que los caracterizan. Estos incluirán un dispositivo dotado de dos puertos USB que trabajan a 5 V, los cuales ya integran el regulador de tensión pertinente que baja la tensión desde los

12 V de la batería. El amperaje estará limitado a 0.7 A que permitirá la carga de los elementos electrónicos a los que conecte.

Sumado a esto, el proyecto contará con otro dispositivo comercial que lea la tensión que existe en cada momento en los bornes de la batería y muestre, seguidamente, el porcentaje de carga que tiene la batería en ese instante.

3-. RESULTADOS

El Resultado del proyecto de forma global se considera un éxito. Si bien es cierto que algunos aspectos no han podido completarse en el tiempo estimado, son aspectos irrelevantes para el funcionamiento del proyecto a nivel general.

Se logró la integración de los diferentes módulos que conforman el proyecto. Iniciándose el flujo de energía en una fuente trifásica de 9 voltios se logró cargar un teléfono móvil a través de la salida de 110 V, 60 Hz.

Por otro lado, desde la misma fuente de energía, se logró la funcionalidad de los dispositivos USB logrando la carga del mismo teléfono móvil de forma satisfactoria. Ambas terminales abastecían la batería de este, que cargaba a un ritmo de 10% cada 20 minutos, estimando una carga total en algo más de tres horas; solo algo más que una carga convencional con elementos comerciales.



Figura 2: Medidor del nivel de carga

Se tomaron muestras de las diferentes medidas que ofrecía el dispositivo electrónico que mostraba el nivel de carga de batería y el error de medida se estimó en únicamente un +/- .5%.

Por último, se aseguró que la carga de la batería se realizaba de forma segura, manteniendo los 15 V de la salida del conversor DC-DC constantes gracias al trabajo del microcontrolador *Arduino* y que en función del nivel de carga, la tensión a la que estaba sometida la batería se modificaba ligeramente como se estudió teóricamente.

4-. CONCLUSIONES

Este proyecto ha servido fundamentalmente para poner el primer paso hacia la globalización de una energía inagotable y renovable como es la eólica en el uso cotidiano de los hogares. La energía solar ha predominado en el ámbito doméstico en los últimos años, pero la ineficiencia supone un hándicap aún por solventar. Añadido a eso, los impuestos y las subvenciones no alcanzan para dotar a los sistemas solares de gran autosuficiencia.

Por ello este proyecto sirve para proponer una alternativa a esa energía y conseguir que, con una gran densidad de energía, el viento constituya la principal fuente de energía para el abastecimiento de los hogares.

No solo eso, sino que mediante una inversión inicial escasa, puedes llegar a cubrir las necesidades eléctricas del hogar, puedes obtener una fuente de energía aislada que alimente dispositivos aun cuando se desconecta de la turbina, puedes devolver energía a la red y aplicar lo que se conoce como *Net Metering*, mediante el cual se aplica una retribución de acuerdo con la compañía eléctrica y en general, se avanza hacia un futuro limpio y eficiente libre de emisiones tóxicas a la atmósfera, el cual todo ingeniero desea.

5-. REFERENCIAS

- [1] D. Hart, Power electronics. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [2] Battery University Charging Lead Acid, web page. Available at: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery. Accessed February 2016.
- [3] WindBlue Power DC-540 Alternator, web page. Available at: http://www.windbluepower.com/Permanent_Magnet_Alternator_Wind_Blue_Low_Wind_p/dc-540.htm. Accessed February 2016.
- [4] LT1513 Battery Charger, datasheet, Linear Technology, Corp., 1996. Available at: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1513fas.pdf>.
- [5] DC/DC and DC/AC PWM Converters, web page. Available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/dc-dc-and-dc-ac-pwm-converters.html>. Accessed March 2016.
- [6] IRS2183 Half-Bridge Driver, datasheet, International Rectifier, 2006. Available at <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irs2183.pdf>.
- [7] Arduino Based Switching Voltage Regulators, web page. Available at: <http://www.instructables.com/id/Arduino-based-Switching-Voltage-Regulators/>. Accessed April 2016.
- [8] F-260U Transformer, datasheet, Triad Magnetics, 2013. Available at: <http://catalog.triadmagnetics.com/Asset/F-260U.pdf>.
- [9] How to Design an Inverter, web page. Available at: <http://www.homemade-circuits.com/2013/03/how-to-design-inverter-basic-circuit.html>. Accessed April 2016.
- [10] IEEE Code of Ethics, web page. Available at: <http://www.ieee.org/about/corporate/governance/p7-8.html>. Accessed March 2016.

BATTERY BOX PROJECT

Author: Rived Martín, Marcos

Director: Katherine O'Kane

Collaborating organization: University of Illinois

PROJECT SUMMARY

1-. INTRODUCTION

This project is based, essentially, on the design of a battery box along with a power electronics system which enables the use of the energy generated in a Vertical Axis Wind Turbine. The Main application of this design will be to provide houses with an efficient system that allows to use wind energy to cover energetic necessities at home such as charging processes, illumination systems, and other electronic devices.

The design will consist of two modules. Firstly, the charging module will transform the energy generated by the wind turbine into stored energy in a lead-acid battery for futures applications. Secondly, it will include a discharging module. This module's function will be to set the platform the user will interact with. It will be detachable from the global system which means a huge advantage when energy is needed remotely from the main source of energy, which is the wind turbine in this particular case.

All of this will be designed following patterns of efficiency and cost that permit to harness available resources and achieve globally beneficial results. This project is considered the first step towards the expansion of wind energy at homes likewise solar energy has been doing this previous years. In addition to that, the initial investment will be continuously reimbursed thanks to the inclusion of a net metering connected and synchronized with the grid that yields benefits according to a contract with the electric company.

2-. METHODOLOGY

The turbine will work thanks to a two-pole synchronous motor which will rotate at constant 240 rpm due to safety issues. This specific motor speed will imply a 9-volt phase-to-line voltage drop across the three-phase outlet of the generator. This voltage drop will be accordingly transformed by the power electronics block in order to feed various devices such as laptop batteries, mobile phone chargers, lamps...

The power electronics block, mentioned before, will be made up of elements that transform the output AC voltage into DC voltage at a determined voltage to be properly stored in a battery and subsequently, feed these electronic devices. For that purpose, these are the elements that will be designed: A three-phase full-bridge rectifier, a DC-DC converter (buck converter), a full-bridge inverter and several devices that supply energy to the user, accordingly.

Firstly, the three-phase full-bridge rectifier will transform 9 V phase-to-line from the generator to roughly 21 V DC with scarce ripple. These 21 V DC voltage are meant to be the input to the buck converter for the next step and it will step them down to constant 15 V at the output to charge the battery.

However, this module is not capable of maintaining 15 V constantly at every time due to disturbances both at the output and input. Thus the necessity of a voltage controller that reads the output, compares it to a voltage reference, set at 15 V, and properly adjusts the duty cycle of the switch to output the desired 15 V to charge the battery. Arduino Uno will be the programmed microcontroller that will run this controller.

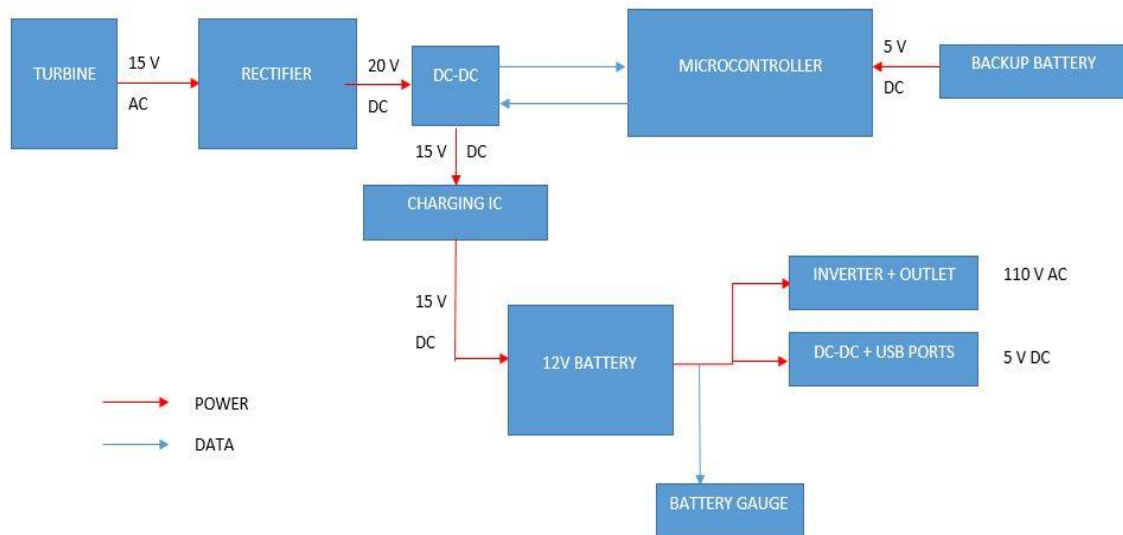


Figure 1: Block diagram

Once the DC-DC converter outputs 15 V regularly thank to the control, implemented on it, there must exist another element between them and the battery that adjusts the voltage depending on the stage at which the battery charging level is. Therefore, an Ic charger will be included to carry out a double function: At first it will properly adapt the voltage to fulfill the battery requirement with regard to the charging level. Secondly it will provide a limitation for the maximum current flowing through it in order to not overcharge the battery and imply a dangerous consequence.

The battery that will be used in this project will be a lead-acid battery. The fundamental reason for it is the safety issues that it implies. Other batteries such as lithium batteries are made of toxic chemical substances that, without the adequate preventions, can be dangerous to people. The second reason is that, when working at low temperatures, this sort of battery works more effectively. According to the characteristics of the project, battery will never work over 35°C, which makes it possible to use a lead-acid battery under those circumstances.

With reference to the discharging module, the user will be able to get involved with the system by charging electronic devices, supply illumination elements or even checking the level of charging of the battery. For the 110-volt outlets an inverter will be designed to transform the 12 V from the battery into an alternating voltage of 12 V, 60 Hz. Subsequently, a transformer will be also implemented to step voltage up from 12 V to 110 V at 60 Hz as well.

The rest of the elements will be purchased from a catalogue to ensure that quality meets the requirement of the functionality. Two USB ports working at 5 V and limited at 0.7 A will be added to the system. These include a voltage regulator that steps down the voltage from 12 V to 5 V.

In addition to that, a battery gauge will be installed along with the battery module so that accurate readouts of the level of charging of the battery can be shown to the user at every time.

3-. RESULTS

The result of the project as global is considered a success. Even though it is true that some aspects have not been able to be completed in the estimated time frame, they are irrelevant to the general running of the system.

The integration of the different modules that together constitute the project have been reached. On the one hand, beginning with an energy flow in a three-phase source, it was possible to charge a mobile phone through a 110V, 60 Hz outlet. On the other hand, from the same energy source, the complete functionality of the USB devices was successfully accomplished, while also the charge of the same mobile phone.

Both terminals provide the battery of it, which charged at a rate of 10% every 20 minutes, estimating a total charge in approximately more than three hours, just a little bit more than a traditional load with commercial elements.



Figure 2: Battery gauge

There were taken samples of the different measurements that the electronic device offered, which indicated the level of charge of the battery. The measurement error was estimated in only +/- 5%. Finally, it was guaranteed that the battery charger was working correctly, keeping the 15V of the output of the converter DC-DC constant thanks to the microcontroller Arduino, which, depending on the level of charge, the voltage that the battery was subdued modified slightly as was examined theoretically.

4-. CONCLUSIONS

Essentially, this project has established the first step toward the globalization of an endless and sustainable energy, like wind energy is, for routine use at home. Solar energy has predominated the domestic field in the previous years, but inefficiency is a handicap yet to be solved. In addition to that, subsidies are not enough yet and financial aid must be improved in order to use this type of energy.

Therefore, this project guarantees an alternative to that energy and achieve that, with a high power density, wind constitutes the main energy source for house supply.

Not only the latter, but starting with a low initial investment, electric necessities at home can be covered, an isolated source of energy can be harnessed, energy can be sold to the grid thanks to the concept of Net Metering. With this wide range of opportunities, that this project offer, a clean future with no toxic chemicals and with plenty of renewable energies seems to be closer.

5-. REFERENCES

- [1] D. Hart, Power electronics. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [2] Battery University Charging Lead Acid, web page. Available at: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery. Accessed February 2016.
- [3] WindBlue Power DC-540 Alternator, web page. Available at: http://www.windbluepower.com/Permanent_Magnet_Alternator_Wind_Blue_Low_Wind_p/dc-540.htm. Accessed February 2016.
- [4] LT1513 Battery Charger, datasheet, Linear Technology, Corp., 1996. Available at: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1513fas.pdf>.
- [5] DC/DC and DC/AC PWM Converters, web page. Available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/dc-dc-and-dc-ac-pwm-converters.html>. Accessed March 2016.
- [6] IRS2183 Half-Bridge Driver, datasheet, International Rectifier, 2006. Available at <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irs2183.pdf>.
- [7] Arduino Based Switching Voltage Regulators, web page. Available at: <http://www.instructables.com/id/Arduino-based-Switching-Voltage-Regulators/>. Accessed April 2016.
- [8] F-260U Transformer, datasheet, Triad Magnetics, 2013. Available at: <http://catalog.triadmagnetics.com/Asset/F-260U.pdf>.
- [9] How to Design an Inverter, web page. Available at: <http://www.homemade-circuits.com/2013/03/how-to-design-inverter-basic-circuit.html>. Accessed April 2016.
- [10] IEEE Code of Ethics, web page. Available at: <http://www.ieee.org/about/corporate/governance/p7-8.html>. Accessed March 2016.

ESTE PROYECTO INCLUYE LOS SIGUIENTES DOCUMENTOS:

Documento N° 1: Memoria

- 1.1 Introducción
- 1.2 Diseño
- 1.3 Resultados
- 1.4 Conclusión
- 1.5 Agradecimientos

Documento N° 2: Análisis de seguridad y riesgos

- 2.1 Introducción
- 2.2 Seguridad

Documento N° 3: Presupuesto

- 3.1 Inversión inicial
- 3.2 Coste de los elementos
- 3.3 Mano de obra

Documento N° 4: Términos éticos

- 4.1 Consideraciones

Documento N° 5: Anexos

DOCUMENTO 1:

MEMORIA

Contenido

1-	Introducción	23
2-	Diseño.....	25
2.1	Rectificador trifásico	25
2.1.1	Análisis teórico	25
2.1.2	Simulaciones.....	29
2.2	Convertor DC-DC	30
2.2.1	Análisis teórico	31
2.2.2	Simulaciones.....	37
2.3	Microcontrolador	38
2.3.1	Iniciación a Arduino	38
2.3.2	Diseño del control.....	39
2.3.3	Simulaciones.....	42
2.4	Cargador de batería.....	43
2.4.1	Análisis teórico	44
2.5	Inversor.....	45
2.5.1	Análisis teórico	45
2.5.2	Simulaciones.....	47
2.6	Placa de circuito integrado	48
2.6.1	Análisis teórico	48
2.6.2	Diseño de los esquemas	49
2.6.3	Diseño de la placa.....	52
3-	Resultados	57
3.1	Rectificador	57
3.1.1	Procedimiento.....	57
3.1.2	Resultados	57
3.1.3	Valoración.....	58
3.2	Convertor DC-DC	59
3.2.1	Procedimiento	59
3.2.2	Resultados	59
3.2.3	Valoración.....	60
3.3	Microcontrolador	61
3.3.1	Procedimiento	61
3.3.2	Resultados	61

3.3.3 Valoración.....	62
3.4 Inversor.....	62
3.4.1 Procedimiento	62
3.4.2 Resultados	62
3.2.3 Valoración.....	63
4-. Conclusión	64
4.1 Resumen final	64
4.1.1 Éxitos	64
4.1.2 Incertidumbres	64
4.2 Trabajo futuro.....	65
5-. Referencias.....	67
6-. Agradecimientos	68

1-. Introducción

Se propondrá el diseño y la implantación de una caja de baterías que almacene la energía generada por una turbina eólica de eje vertical compuesta de un generador síncrono trifásico de dos polos girando a 240 rpm y produciendo una tensión de línea de 9 voltios. Se supondrá una velocidad de rotación invariable dado que la turbina está dotada de un control de velocidad que la mantiene constante con independencia de la velocidad relativa del viento para cada situación. Una vez almacenada, la energía podrá ser descargada para alimentar dispositivos electrónicos como cargadores de móviles y ordenadores, calefactores y otros elementos conectados a 120 V, 60 Hz.

El proceso de transformación de energía comenzará desde los 9 V (eficaces) de tensión de línea del generador trifásico y concluirá con los 15 V necesarios de tensión continua para cargar la batería seleccionada. Para ello se dispondrá de un rectificador trifásico que corrija la señal; un filtro de paso bajo de segundo orden, que reduzca el rizado de tensión y corriente de salida; un conversor DC-DC con control de realimentación que ajuste a 15 V la salida y por último un chip que asegure una carga eficaz y libre de riesgos a corriente constante de la batería.

Por otro lado, la batería será de 12 V tensión nominal por lo que se implementará un regulador de tensión para obtener los 5 V con los que funciona la mayoría de dispositivos electrónicos mediante puertos USB. Además, para la salida de alterna a 120 V, 60 Hz, se construirá un inversor monofásico junto con un transformador 12-120 V. Todo esto se puede apreciar con mayor claridad en el diagrama de bloques representado en la Ilustración 1.

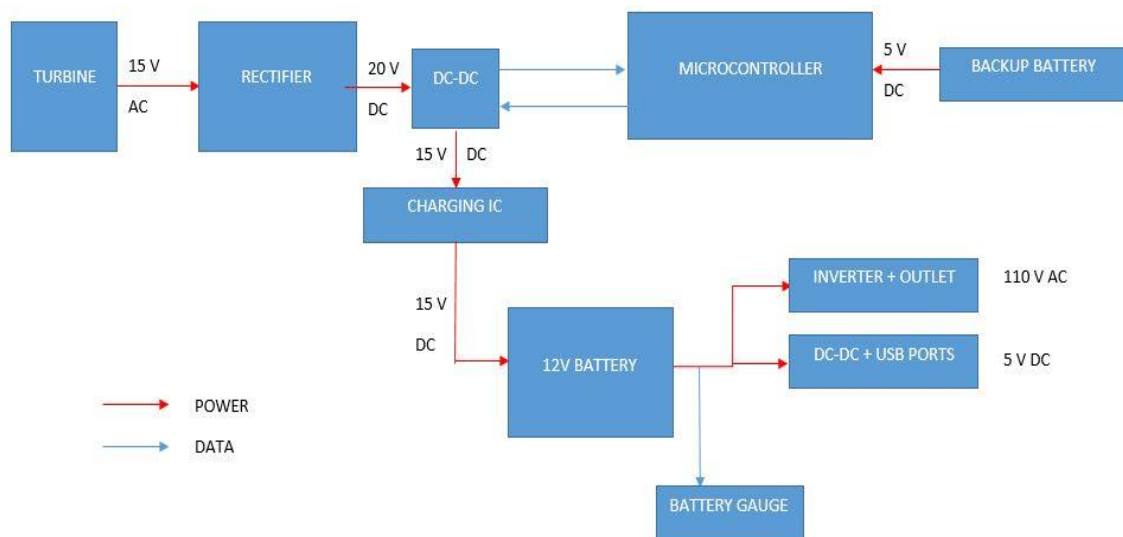


Ilustración 1: Diagrama de bloques completo

Cada bloque será explicado con detalle en apartados posteriores indicando los componentes que lo componen, su principio de funcionamiento y los resultados obtenidos en su ejecución. Todos ellos se establecerán en un circuito integrado colocado en una placa sobre la que se

soldarán para disminuir las pérdidas de ensamblaje y otras pérdidas residuales debidas a imprecisiones de montaje.

En definitiva, este proyecto buscará lograr un conjunto de elementos de transformación de energía dispuestos en un espacio reducido en favor de la manejabilidad del sistema. A su vez, la parte de la batería y las diversas salidas (enchufes, USB...) podrá ser portátil y podrá manejarse con independencia de la turbina eólica una vez que las baterías estén cargadas. De esta forma se espera lograr un gran ahorro energético y dar el primer paso hacia la autosuficiencia en los hogares a través de una energía limpia y sostenible como es la energía eólica.

2-. Diseño

En los siguientes apartados de esta sección se detallarán todos y cada uno de los bloques definidos previamente, explicando la función que realizan, la importancia en el sistema global y los elementos que integran a cada uno de ellos.

2.1 Rectificador trifásico

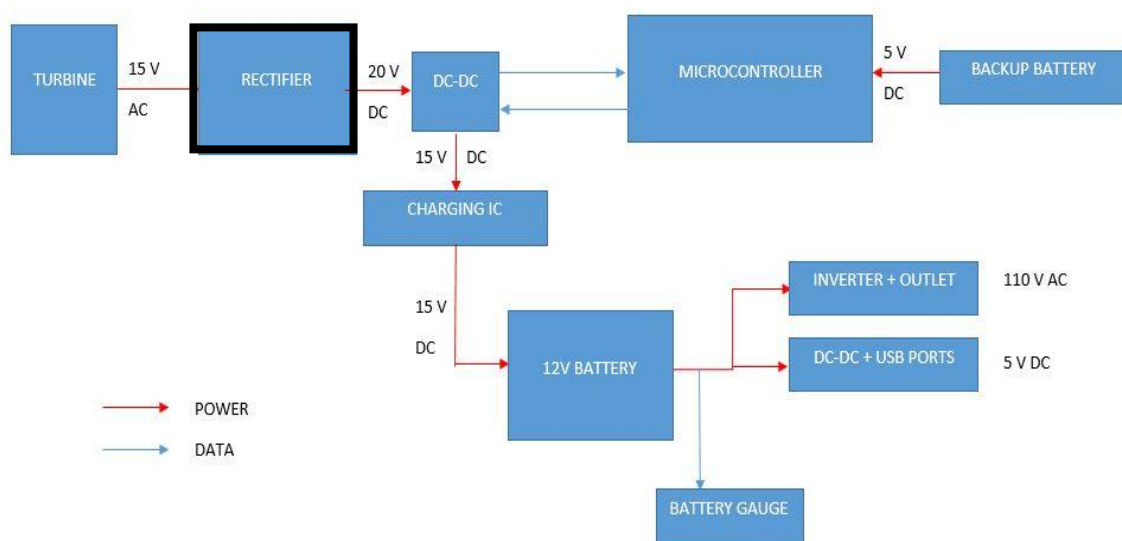


Ilustración 2: El rectificador es el primer bloque del sistema

2.1.1 Análisis teórico

Un rectificador trifásico es un elemento de electrónica de potencia que convierte, mediante la disposición lógica de unos diodos, una señal alterna trifásica en una señal monofásica continua. El esquema típico que se suele emplear es el representado en la Ilustración 2. Su principio de funcionamiento y el resultado esperado se muestra en la Ilustración 3.

Siguiendo la ley de Kirchhoff a lo largo de cualquier vía se confirma que únicamente los diodos D_1 , D_3 y D_5 pueden conducir simultáneamente y el diodo que en ese preciso instante esté conduciendo tendrá su ánodo conectado a la tensión compuesta que sea mayor.

De la misma forma, los diodos D_2 , D_4 y D_6 actuarán de la misma forma con la excepción de que al conducir conectarán su cátodo a la tensión compuesta más pequeña en cada fase de conducción.

Consiguientemente, la tensión a la salida del rectificador será una de las tensiones compuestas cada vez. Por ejemplo, cuando los diodos D_1 y D_2 estén conduciendo, la tensión de salida será V_{ac} . Además, los diodos que conduzcan están determinados por la tensión

compuesta mayor en cada instante, es decir, cuando, por ejemplo, V_{ac} sea la mayor, esa misma será la tensión en la carga.

Hay seis combinaciones diferentes de tensiones compuestas (tres fases de dos en dos). Considerando un período angular de 360° , cada transición de tensión compuesta mayor debe ocurrir cada $360/6=60^\circ$. Esto hace que a este circuito se le conozca también como un “Rectificador de seis pulsos”.

La frecuencia fundamental de la tensión de salida es 6ω donde ω es la frecuencia de la secuencia trifásica de la fuente. De esta forma, la tensión de salida estará regida por la Ecuación (1), para $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$ y un periodo de $\pi/3$ para la determinación de los coeficientes de Fourier.

$$V_o(\omega t) = \sqrt{2}V_{ff}\sin(\omega t) \quad (1)$$

Partiendo de la ecuación base de la serie de Fourier para una función periódica presentada en la Ecuación (2), las Ecuaciones (3) y (4) muestran el cálculo de los coeficientes de dicha ecuación, donde V_{ff} representa la tensión compuesta.

$$v_o(t) = V_o + \sum_{n=6,12,18\dots}^{\infty} V_n \cos(n\omega_o t + \pi) \quad (2)$$

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2}V_{ff} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}V_{ff}}{\pi} = 0.955\sqrt{2}V_{ff} \quad (3)$$

$$V_n = \frac{6\sqrt{2}V_{ff}}{\pi(n^2 - 1)} \quad n = 6, 12, 18 \dots \quad (4)$$

Una ventaja del rectificador trifásico con respecto al monofásico es que la señal de salida es, inherentemente, muy similar a una señal de continua y que, gracias a los armónicos de baja amplitud y alta frecuencia, los filtros se presentan más efectivos.

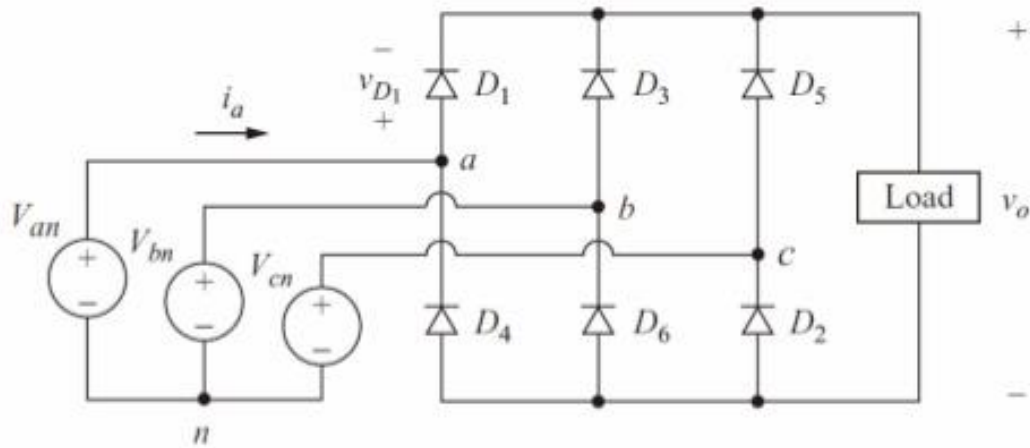


Ilustración 3: Esquema típico del rectificador trifásico

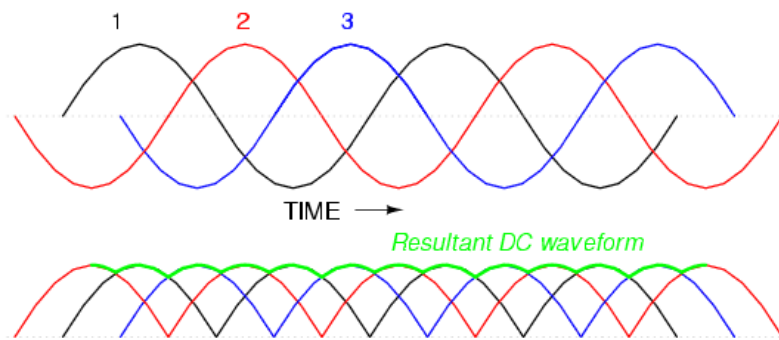


Ilustración 4: Señal esperada a la salida del rectificador

Haciendo referencia a las ecuaciones presentadas a continuación, se destaca que la tensión esperada a la salida del rectificador trifásico será de 0.955 veces la amplitud de la tensión compuesta que proporciona la fuente trifásica, en este caso, el generador.

Como resultado de lo anterior, se puede deducir que la tensión esperada en la carga se establecerá conforme a lo expuesto en la Ecuación 5 y será de 21 V, asumiendo que la tensión de entrada (V_f) será de 9 V a la velocidad del motor establecida de 240 rpm.

$$V_{out} = V_f * \sqrt{3}\sqrt{2} * 0.955 = 21.05 \text{ V} \quad (5)$$

Se escogió un diodo *Schottky* para establecer las transiciones necesarias en este circuito y se colocaron seis, dispuestos como se mencionó anteriormente, formando un “Puente universal” y se añadió un filtro de segundo orden de paso bajo para reducir el rizado tanto de la corriente de salida como de la tensión.

El esquema empleado, teniendo en cuenta todo lo explicado se puede observar en la Ilustración 4. Como nota aclarativa, la carga empleada para realizar el ejercicio se escogió de 25 Ohmios para aproximar la corriente esperada en próximas simulaciones.

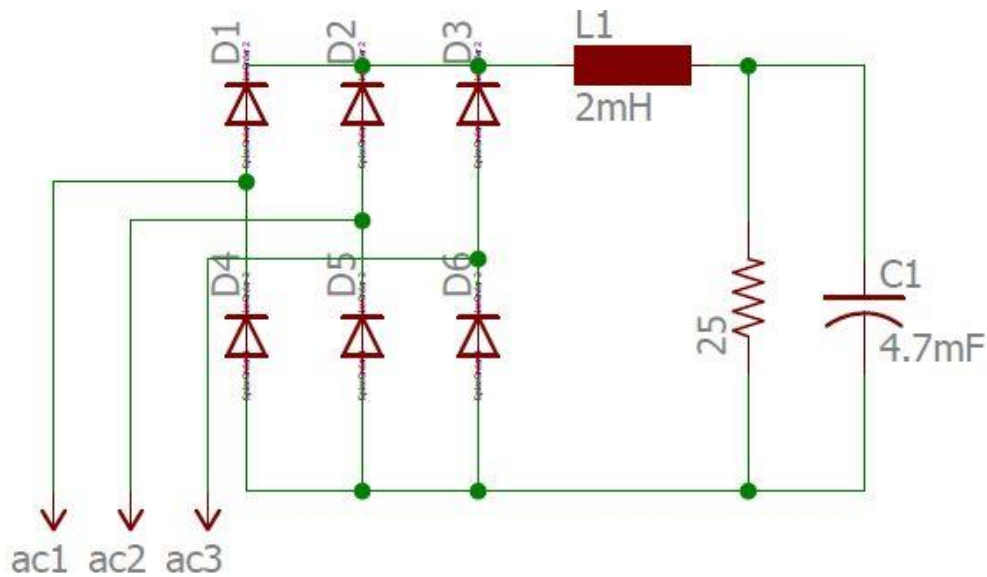


Ilustración 5: Rectificador trifásico con filtro

Para el cálculo del filtro se comenzó afirmando que se necesita un paso bajo para atenuar armónicos de alta frecuencia y lograr una señal de salida cercana a una señal de continua.

Además, tanto la corriente como la tensión de salida, en el caso de presentar un alto rizado, pueden suponer un serio riesgo para la integridad de los próximos elementos que tengan que lidiar con ellas. Por esta razón, se decidió emplear un condensador y un inductor para hacerlo de segundo orden y tener la posibilidad de controlar ambas señales.

De esta forma se procede al cálculo de la función de transferencia del sistema:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{R \frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}}}{\frac{R \frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}} + Ls} \quad (6)$$

Que, buscando que ω_c sea 70 Hz y aproximando a los valores comerciales que la empresa distribuidora *Digikey* presenta, se obtuvieron los siguientes resultados:

- C = 4.7mF
- L = 2mH
- R = 25 Ω

2.1.2 Simulaciones

En este apartado se expondrán los resultados de las simulaciones ejecutadas con el software matemático Matlab con los elementos explicados anteriormente y los valores calculados teóricamente.

El esquema sigue siendo el mostrado en la Ilustración 5 acompañado del filtro de paso bajo para reducir al máximo los armónicos de la señal de salida y lograr un rizado ínfimo.

En primer lugar se muestra la gráfica correspondiente a la tensión de salida del filtro, tomando como entrada una tensión trifásica de nueve voltios eficaces entre fase y tierra.

Los ejes vertical y horizontal corresponden a tensión y tiempo, respectivamente.

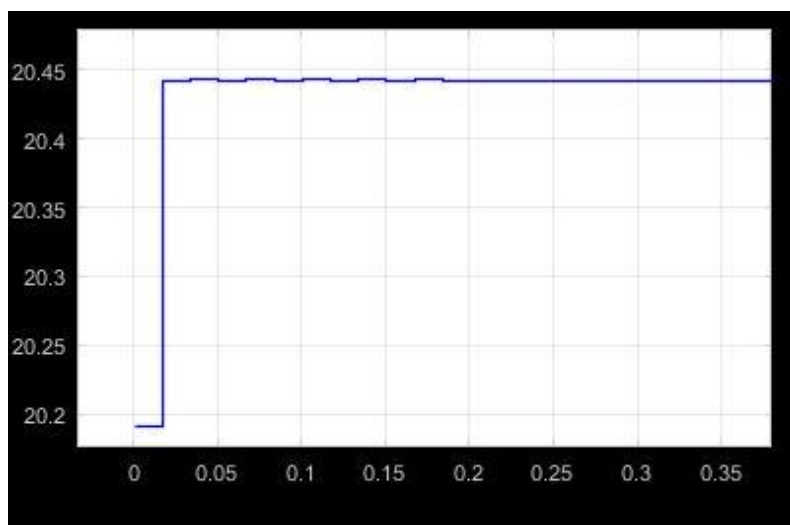


Ilustración 6: Tensión de salida vs tiempo

A continuación se muestra la gráfica en el tiempo de la corriente que atraviesa la carga, siendo los ejes vertical y horizontal, la corriente y el tiempo, respectivamente.

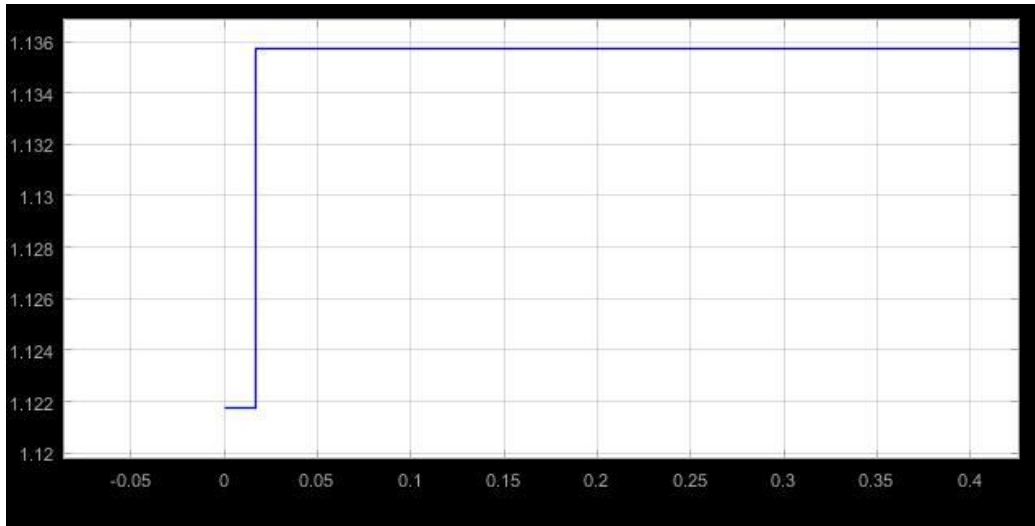


Ilustración 7: Corriente de salida vs tiempo

En ambas simulaciones se puede comprobar cómo el rizado de las señales es mínimo e incluso imperceptible. Esto se debe a los valores escogidos tanto para el condensador como para el inductor, que logran de forma casi perfecta, atenuar este fenómeno.

2.2 Conversor DC-DC

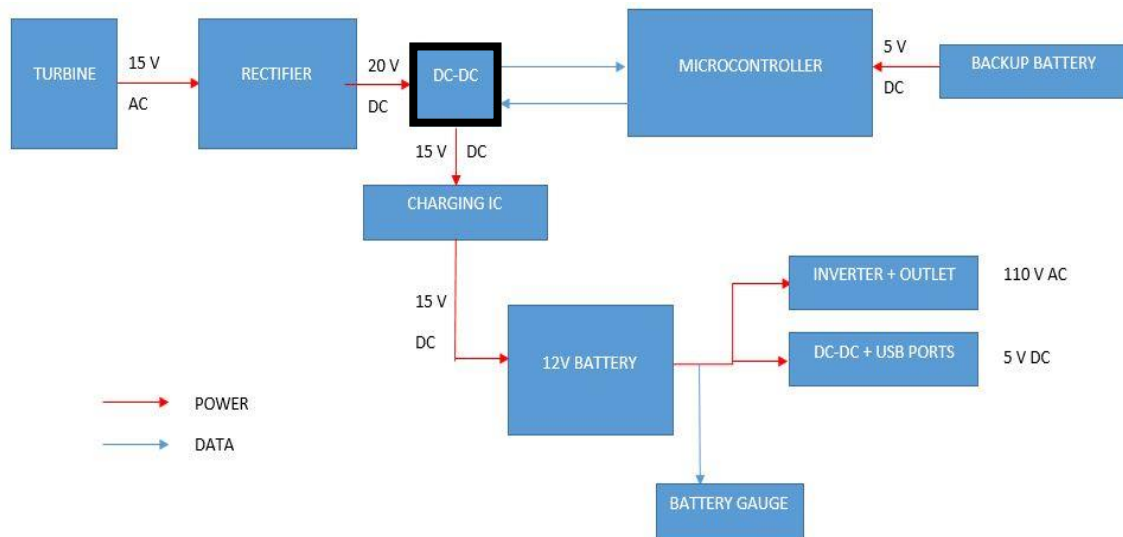


Ilustración 8: El convertor DC-DC se sitúa a continuación del rectificador

2.2.1 Análisis teórico

Un conversor DC-DC nace del fundamento del circuito con interruptor controlado. Variando el porcentaje de cada periodo en el que un determinado interruptor está encendido o apagado se puede modificar la media de la señal que se introduce a dicho circuito.

A grandes rasgos y de forma imprecisa, la tensión de carga que soporta R_L en la Ilustración 6 puede ser calculada siguiendo la Ecuación (7), donde la variable D responde a ese porcentaje de cada periodo en el que el interruptor está encendido.

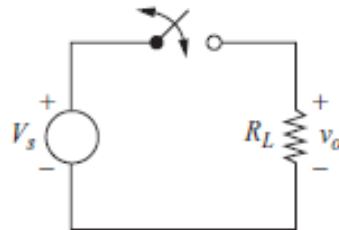


Ilustración 9: Circuito con interruptor

$$V_{out} = V_{in} * D \quad (7)$$

El elemento electrónico más empleado para actuar como interruptor es el MOSFET; un transistor controlado que se enciende y apagada a una determinada frecuencia. Según el esquema presentado antes, cuando el interruptor está cerrado, la tensión de salida es exactamente la misma que la de entrada, mientras que cuando está abierto, la tensión de salida es directamente 0.

Formalmente expresado, la Ecuación (8) muestra la relación entre la tensión de entrada y salida:

$$V_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_{in}(t) dt = v_{in} D \quad (8)$$

La potencia consumida por el interruptor ideal es cero. Cuando está abierto, no hay corriente fluyendo a través, mientras que cuando está cerrado no hay caída de tensión. Sin embargo, las pérdidas en una situación real tendrán lugar porque sí hay caída de tensión cuando está cerrado y la tensión de salida no es exactamente igual que la tensión de entrada.

En concreto, el conversor conocido con el sobrenombre inglés "*Buck converter*" es un circuito basado en lo explicado previamente, en el que un MOSFET, típicamente, se enciende y apaga para modular la tensión de salida, que a su vez, es filtrada por un filtro de paso bajo para obtener una señal, sin apenas rizado, óptima. Si el filtro es ideal, la salida es la media de la entrada.

A continuación se muestra una serie de circuitos para analizar en profundidad el funcionamiento de este tipo de conversor.

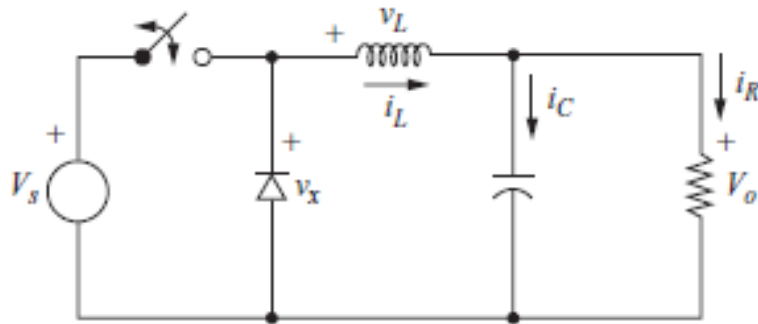


Ilustración 10: Esquema del conversor

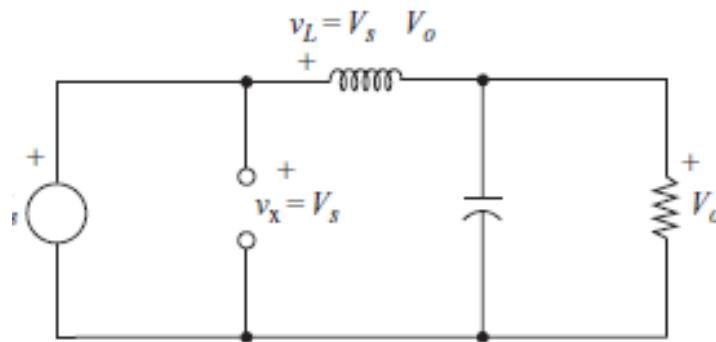


Ilustración 11: MOSFET cerrado

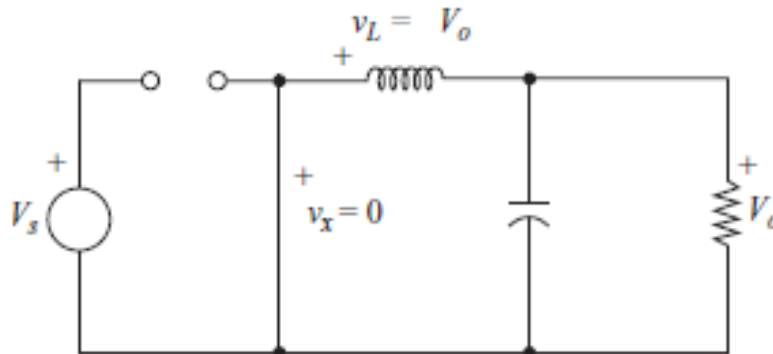


Ilustración 12: MOSFET abierto

Estudiando los circuitos expuestos anteriormente, se comprueba cómo la entrada al filtro, que está denotado como v_x , cuando el MOSFET está cerrado (durante un periodo DT) es V_s y cuando está abierto (durante un periodo $(1-D)T$), por el contrario, es cero. De esta forma, la tensión que va a ser filtrada y que existe a la entrada del filtro se expresa como $V_s D$.

Este análisis asume que el diodo conduce todo el tiempo mientras el interruptor está abierto, implicando que la corriente que fluye a través del inductor es positiva. Una corriente positiva que atraviesa un inductor durante un periodo es también llamada "corriente continua". Por el contrario, corriente discontinua está caracterizada por el regreso a cero de la corriente del inductor en cada periodo

Se tomarán las siguientes asunciones para los posteriores análisis de este circuito:

- El circuito opera en régimen permanente
- La corriente del inductor es positiva

- El condensador es muy grande, así que la tensión de salida se mantendrá constante y de valor V_o
- El periodo es T , por lo que el MOSFET está cerrado un periodo DT y se abrirá durante $(1-D)T$.
- Los componentes son ideales.

En primer lugar se estudiará el periodo en el que el interruptor está cerrado. Durante este tiempo, el circuito resultante es el mostrado en la Ilustración 7. Gracias a la asunción de que se trabaja en régimen permanente, la media de la tensión durante un periodo completo (abierto y cerrado) debe ser cero, por lo tanto durante DT la tensión será:

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (9)$$

Por consiguiente:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (10)$$

Y dado que la derivada de la corriente es una constante positiva, la corriente aumenta de forma lineal como muestra la Ilustración 9 y el valor es mostrado en la Ecuación 11

$$(\Delta i_L)_{closed} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (11)$$

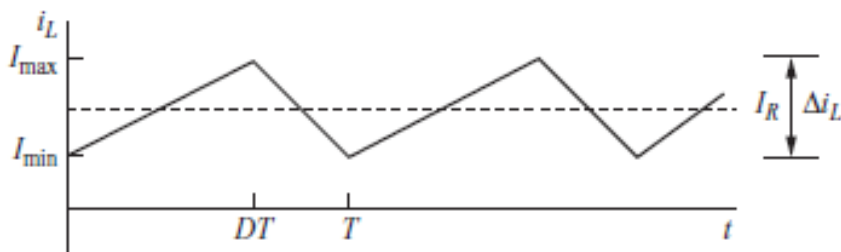


Ilustración 13: Variación de la intensidad de inductor

Sustituyendo valores se obtiene:

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT - \left(\frac{V_o}{L} \right) (1 - D)T = 0 \quad (12)$$

$$V_o = V_s D$$

Que es el mismo resultado obtenido en párrafos anteriores. Como conclusión, este convertidor genera una señal que es menor o igual que la señal de entrada dado que la variable D no puede ser nunca mayor que 1.

Hay que reseñar que la tensión de salida solo depende de la variable D, por lo que una perturbación, por mínima que sea, en la entrada justifica la necesidad de ajustar D. Para ello se dispondrá de un bucle de realimentación que mida la tensión de salida, la compare con una referencia y modifique, según convenga en cada caso, el ciclo. Esto se detallará en secciones posteriores.

Ahora que la variable tensión está analizada, la siguiente preocupación será la intensidad de salida, que estará influenciada, en gran medida, por la actuación del inductor. La Ecuación 13 aporta la expresión de la variación de intensidad del inductor, por lo que se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = V_o \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (13)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = V_o \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (14)$$

Donde f representa el inverso del periodo 1/T.

Para conseguir que el circuito trabaje en todo momento en modo de conducción continuo, I_{min} deberá ser igual a cero o mayor, donde cero representa el mínimo para cumplir dicha condición. De esta forma, analizando las variables de las que depende, se puede obtener la expresión que reporta el valor de la inductancia mínima para este convertidor de forma que no se llegue a trabajar en ningún momento en discontinuo.

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (15)$$

Una vez estudiado el rizado implícito en la corriente de salida de este convertidor, se procede a hacer lo propio con el rizado de tensión que lleva inherente la salida.

En párrafos anteriores se asumió el hecho de que el condensador es muy grande, lo que hacía la primera aproximación bastante simple. En la práctica, nunca puede ser así. Para estudiar el comportamiento se hace referencia a la relación intrínseca entre corriente y tensión del condensador.

Mientras la corriente que atraviesa el condensador es positiva, este mismo se carga:

$$\Delta Q = C \Delta V_o \quad (16)$$

La Ilustración 10 recoge el comportamiento de la intensidad que atraviesa el condensador durante un periodo junto con el estudio del proceso de carga y descarga que esta implica.

El cálculo del área sombreada en la misma Ilustración aporta la variación de tensión que acompaña y, finalmente, más abajo, se adjunta la expresión del valor del condensador mínimo necesario para trabajar en régimen continuo.

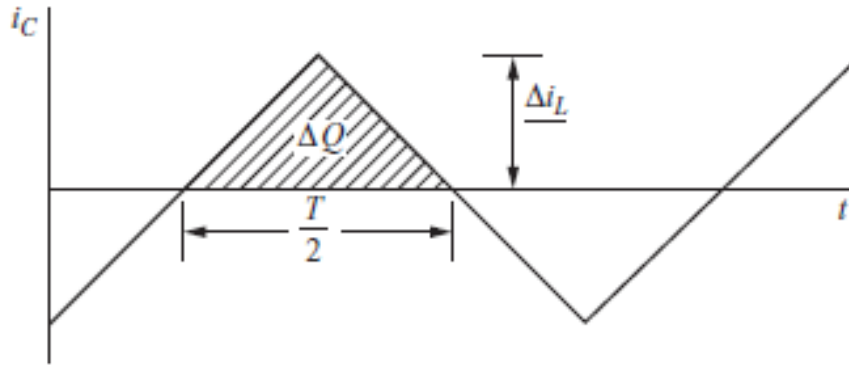


Ilustración 14: Intensidad del condensador

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (17)$$

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (18)$$

$$C_{min} = \frac{1 - D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2} \quad (19)$$

Si el rizado no es muy largo, lo cual está fuertemente condicionado por el valor de esta capacitancia, el voltaje de salida será prácticamente constante y el anterior análisis será también perfectamente válido siempre.

En el diseño utilizado en este proyecto, además del bucle abierto, se incluirá una realimentación para ajustar el ciclo del MOSFET y mantener la tensión de salida constante de acuerdo a la siguiente Ilustración.

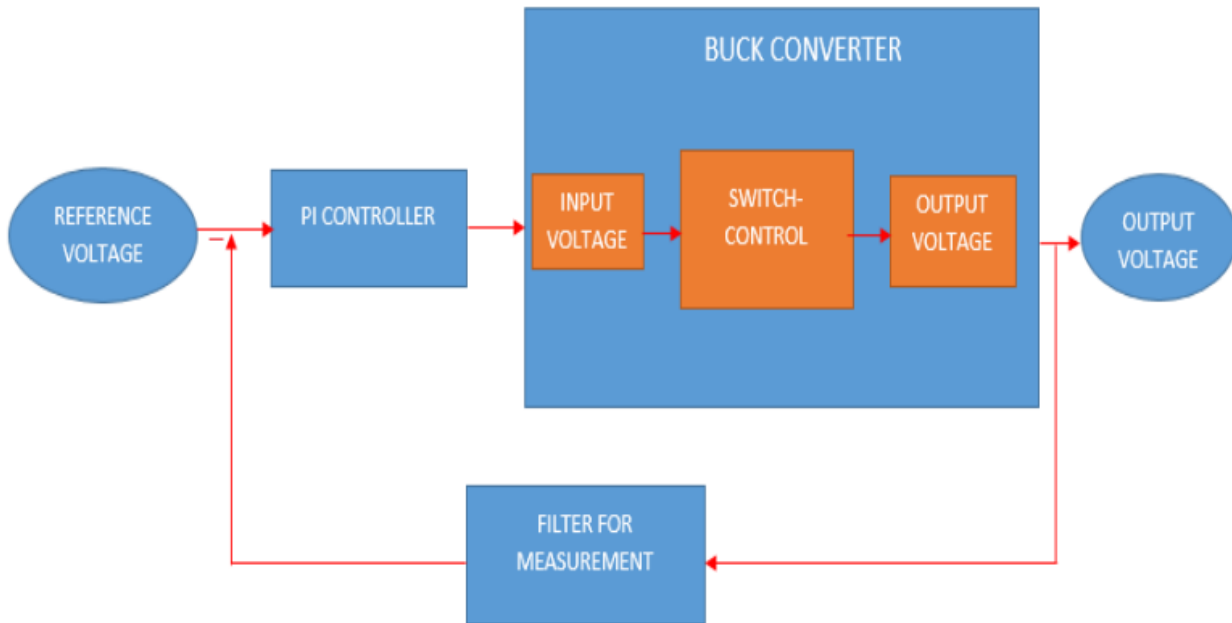


Ilustración 15: Diagrama de bloques del convertor DC-DC

El esquema que se empleará para llevar a cabo este convertor se muestra en la siguiente ilustración y se procederá a explicar con todo detalle los elementos que lo componen, su función y la interconexión entre los diferentes elementos.

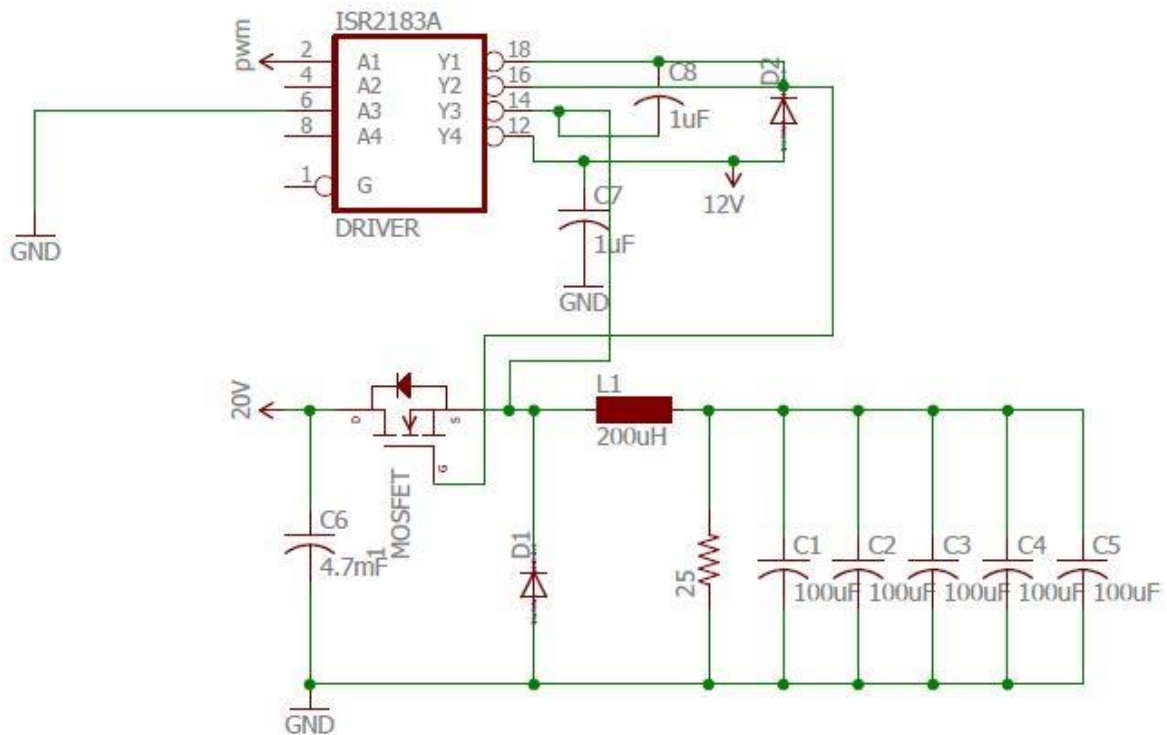


Ilustración 16: Esquema del convertor DC-DC

En primer lugar destaca la parte superior de la Ilustración, donde se sitúa un elemento denotado como DRIVER. Para el control del MOSFET se escogió una frecuencia de interrupción de 50 kHz por lo que una señal PWM emitida a la base del MOSFET no es suficiente para activarlo y desactivarlo a semejante velocidad. Es por ello que se requiere de un elemento auxiliar que recibiendo una señal PWM por uno de los pines de entrada, logre ajustar la frecuencia deseada al MOSFET.

Los elementos auxiliares que necesita el DRIVER para actuar son los recomendados en el *datasheet* adjuntado en el ANEXO A.

El diodo empleado será, una vez más, un diodo *Schottky* de 25 V y 3 A, fundamental para hacer funcionar un convertor directo como es este.

El inductor se escogió de 200 mH; el rizado y la funcionalidad será de inferior calidad al inductor escogido para el rectificador trifásico, pero, por el contrario, el precio será mucho menor y la capacidad de filtrado más que suficiente en este caso.

La carga será de nuevo de 25 Ω para lograr una intensidad próxima a la deseada en condiciones de funcionamiento reales con todo el sistema incluido.

Por último, el condensador de salida se escogió de 500 μF , un valor adecuado para actuar en tándem con el inductor en el filtrado y reducir el rizado de la tensión de salida de forma considerable. Para mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas debidas al efecto Joule por la resistencia en serie conocida como ESR se colocaron cinco condensadores en paralelo de forma que la capacitancia equivalente coincida con los 500 μF deseados a priori.

2.2.2 Simulaciones

A continuación se muestran los resultados de la simulación correspondiente al convertor DC-DC empleando el mismo esquema presentado anteriormente.

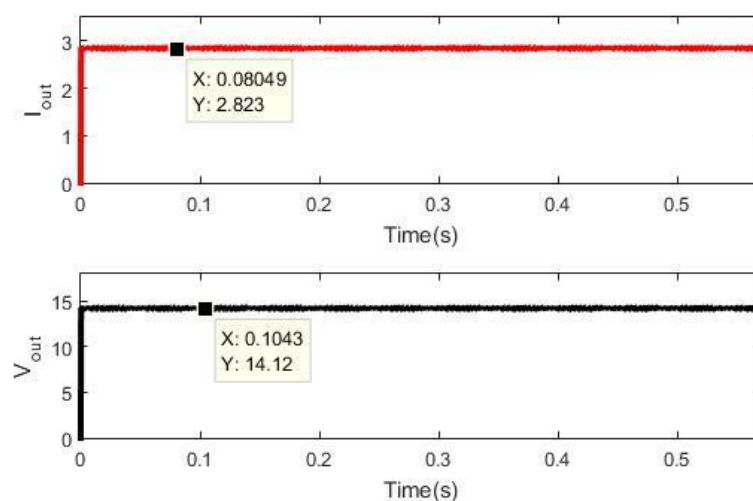


Ilustración 17: Corriente y tensión vs tiempo

De nuevo se aprecia cómo el régimen permanente se mantiene constante a lo largo del tiempo. Por el contrario, las dos desventajas que presenta esta simulación son las siguientes:

- Por un lado, la tensión de salida no se corresponde con los 15 V deseados como se explicó antes, que se necesitan para cargar la batería a la que se conectará este convertidor. Esto se debe a que existe caída de tensión en algunos de los elementos del circuito ya que la simulación contó con ello. Por ello se aconseja la inclusión de un control como se discutirá más adelante
- Por otra parte, la simulación se llevó a cabo sin tener en cuenta el efecto de las perturbaciones externas; es por ello por lo que el régimen permanente se mantiene tan perfecto.

2.3 Microcontrolador

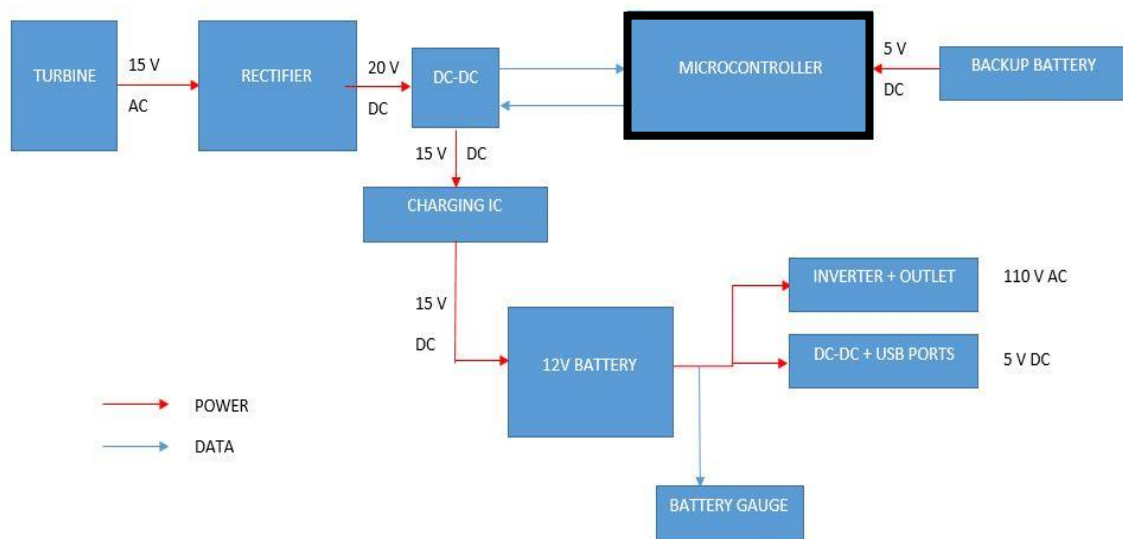


Ilustración 18: El microcontrolador afectará al convertidor DC-DC

2.3.1 Iniciación a Arduino

Arduino se considera una plataforma de electrónica abierta capaz de recibir información de muchos tipos gracias a la serie de pines que posee y de afectar al entorno a través de secuencias lógicas que tienen un determinado resultado exteriorizado gracias, de nuevo, a los pines.

El lenguaje de programación que se emplea para formar secuencias lógicas es el lenguaje *Arduino*. Otra de las ventajas que este software maneja es la portabilidad, es decir, la capacidad de ser ejecutado sin la necesidad de un ordenador al que ser conectado. Sin embargo, también tiene la funcionalidad de conectar varios softwares diferentes simultáneamente.



Ilustración 19: Arduino posee una gran manejabilidad

El Hardware de *Arduino* está basado en el microcontrolador ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280. Los programas se basan, fundamentalmente en el lenguaje de programación C y C++ y se compilan en el compilador de código avr-gcc.

Entre las ventajas más significantes que este microcontrolador posee destacan:

- No se necesita un programador externo gracias al que ya posee internamente
- No requiere de grandes conocimientos informáticos y su facilidad de aprendizaje hace de *Arduino* una herramienta frecuentemente escogida para programar.
- Se trata de un hardware abierto. Esto implica las inmensas posibilidades de desarrollo de sistemas electrónicos
- Ya contiene todo el ensamblaje montado, lo que ahorra tiempo y espacio en el *protoboard*, al que solo se conectarán cables de forma externa a los pines etc.

Sin embargo, la poca complejidad también induce una serie de desventajas a tener en cuenta a la hora de usar *Arduino*:

- El precio es elevado, comparado con PICS, PICAXE o integrados de AVR
- No existe una amplia gama de *Arduino*, lo que complica las circunstancias cuando el diseño no alcanza los requisitos de *Arduino*
- *Arduino* comienza a funcionar nada más activarlo, lo cual puede suponer un peligro si existe algún fallo durante el periodo transitorio inicial.

2.3.2 Diseño del control

Como ya se ha explicado en secciones anteriores, el diseño de un bucle abierto se queda escaso para este proyecto. La necesidad de obtener 15 V constantemente a la salida del convertor DC-DC es elevada y cualquier perturbación por mínima que sea en este planteamiento puede tener consecuencias peligrosas como se estudiará en la sección de seguridad más adelante.

Por consiguiente, se dispondrá de un control de lazo cerrado que, de forma iterativa, ajuste el ciclo del PWM que maneja el DRIVER del MOSFET y mantiene 15 V a la salida del convertidor.

Esto se puede apreciar de forma gráfica en el siguiente gráfico:

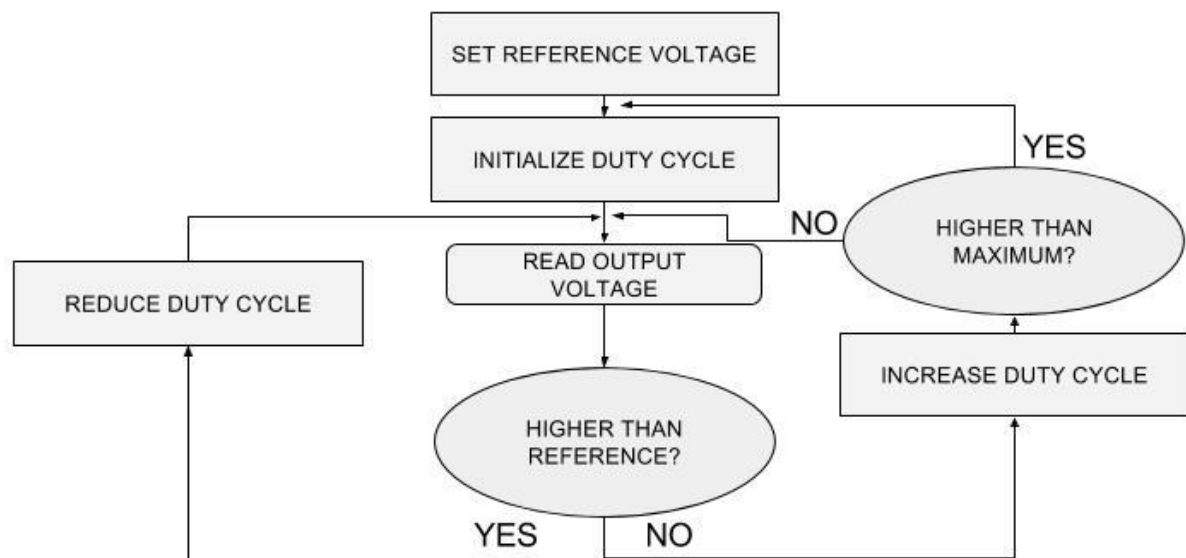


Figura 3: Lazo cerrado

Hay que destacar la necesidad de colocar un límite superior para el ciclo ya que la variable D que lo controla no puede ser mayor que 1 en ningún caso. El código completo se adjunta en el Anexo B.

El esquema para integrar el controlador junto con el convertidor se muestra a continuación.

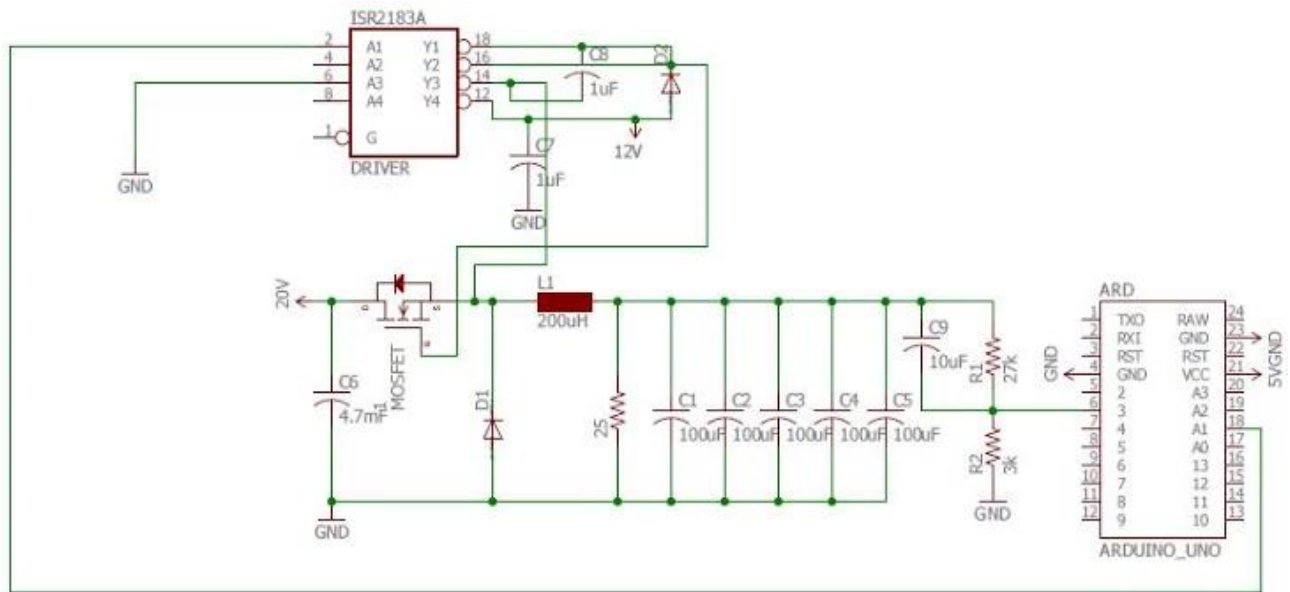


Ilustración 20: Esquema completo con el control

Cabe destacar que *Arduino* posee una función lógica conocida como “*analogRead*” que lee un determinado valor y lo transforma en un número entre 1 y 1023 con un máximo de 5 V correspondiente a los 1023 del lenguaje *Arduino*.

Sin embargo, la tensión que se leerá en esta ocasión oscilará en torno a 15 V +/-1 V por lo que hará falta un ajuste para hacer posible su lectura en el microcontrolador. Dicho ajuste consiste en un divisor de tensión simple que aúne tres características fundamentales.

- En primer lugar las pérdidas por efecto Joule en las resistencias deberán ser lo más pequeñas posibles, minimizando al máximo la intensidad que circule, es decir, maximizando el valor de las resistencias.
- La relación de resistencias tendrá que satisfacer la relación de que 16 V (con un margen de seguridad de 1 V) equivalga a 5 V en *Arduino*, siguiendo la siguiente ecuación:

$$V_o = V_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

- La maximización de las resistencias no debe comprometer la precisión de lectura de la tensión, ya que una intensidad demasiado pequeña circulando por *Arduino* puede inducir errores y el malfuncionamiento de la secuencia lógica

Se incorporará un condensador en paralelo con el fin de mantener la tensión constante con mayor precisión y evitar variaciones en la lectura.

2.3.3 Simulaciones

Se simuló el convertor DC-DC junto con el control para comprobar que ante una pequeña perturbación a la entrada, se ajusta el ciclo y se mantienen 15 V de forma constante. Los resultados se muestran a continuación.

En primer lugar se adjuntan las gráficas de la corriente y la tensión a la salida del convertor después de aunarlos con el control.

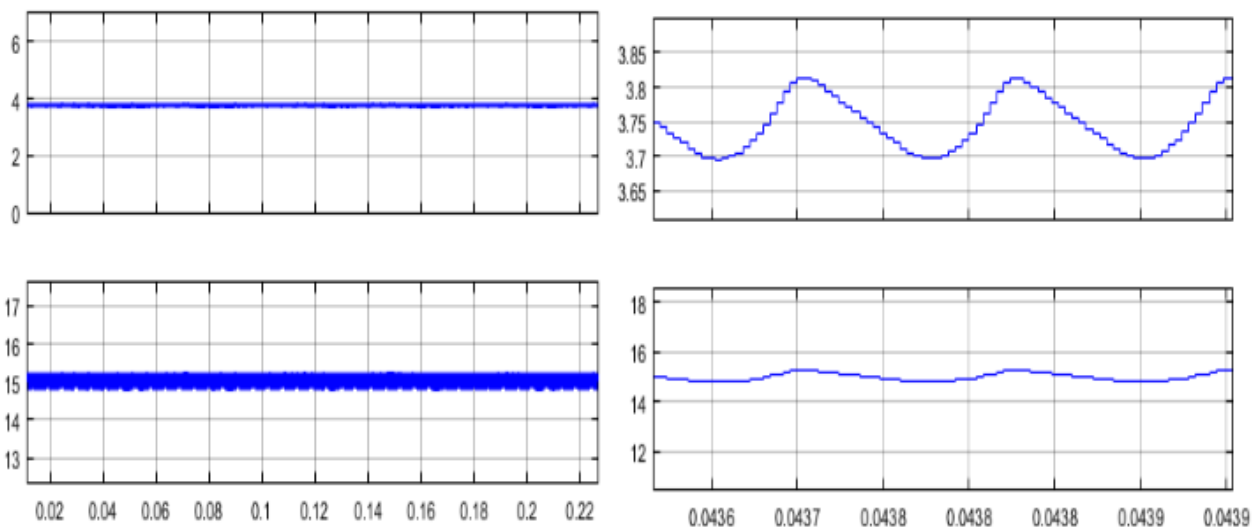


Ilustración 21: Corriente y tensión vs tiempo con sus respectivos rizados

Una vez que los resultados obtenidos en la simulación del convertor y el control fueron satisfactorios se prosiguió a implementar el rectificador trifásico y medir de nuevo la tensión y la corriente de la carga colocada a la salida.

Se colocará una resistencia de 4.7Ω como carga y se tomarán muestras de las gráficas tanto de la tensión de salida (se esperan 15 V) como de la intensidad que la atraviesa (se esperan $15/4.7$ A)

La Ilustración 19 muestra el transitorio de ambas señales, con un sobrepaso muy pequeño debido a la inicialización del ciclo desde el valor cero por lo que la respuesta será lenta pero precisa.

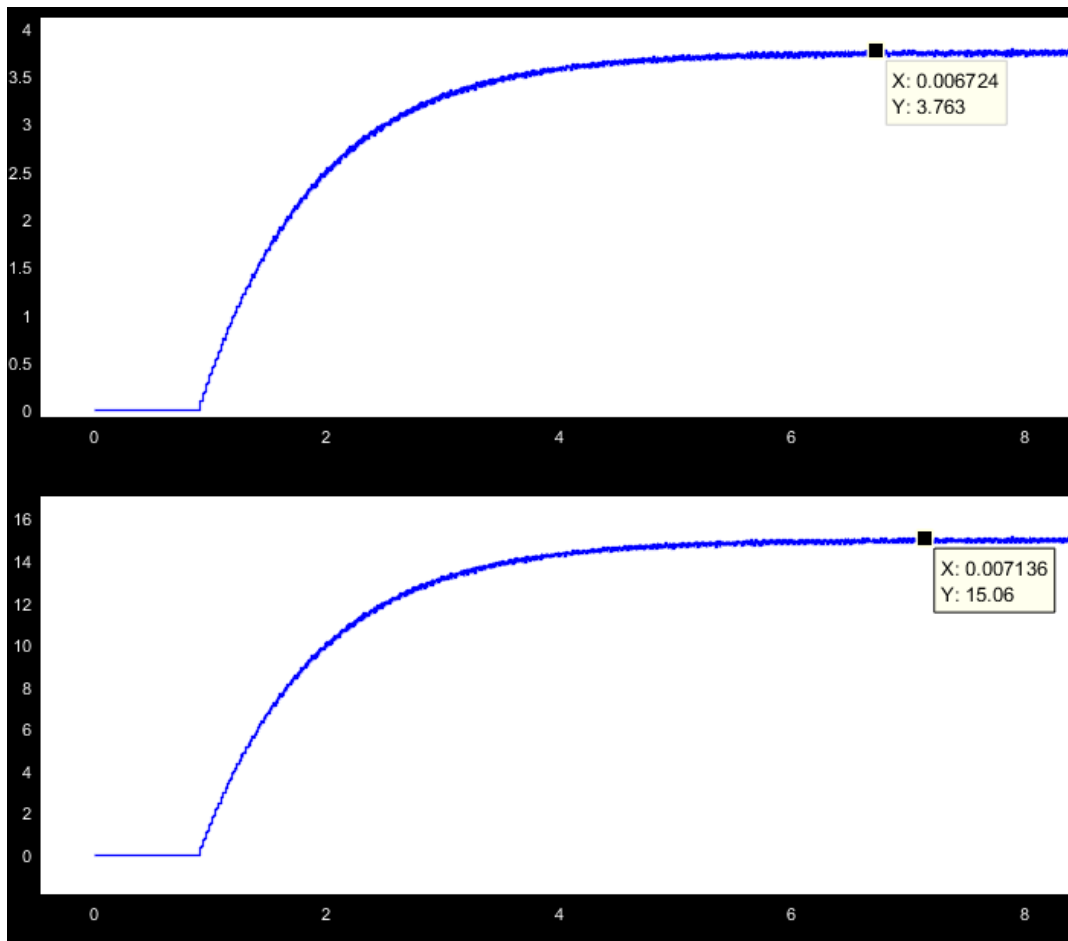


Ilustración 22: Corriente y tensión vs tiempo (ms)

2.4 Cargador de batería

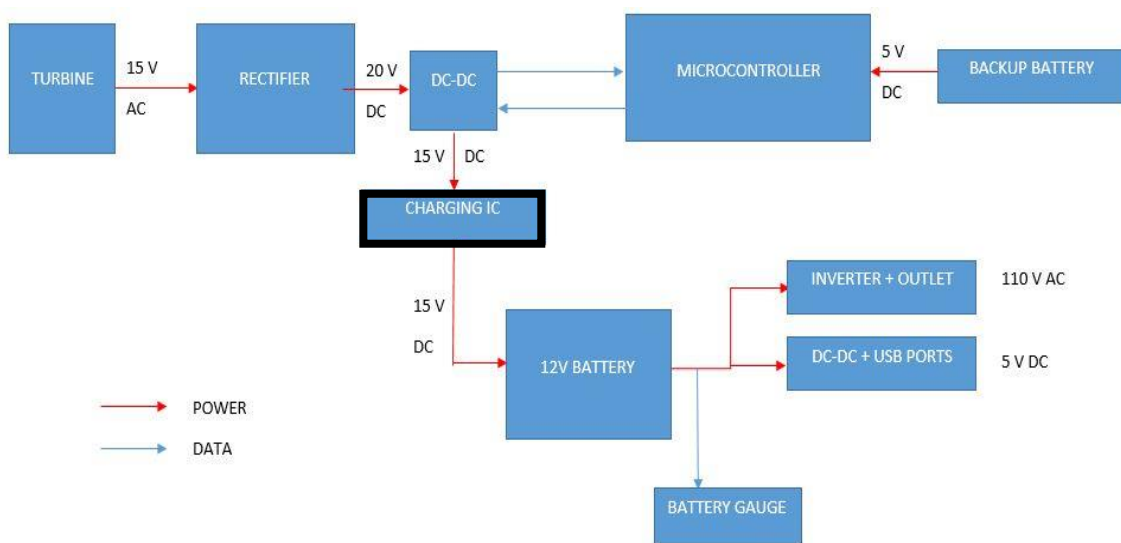


Ilustración 23: El cargador será fundamental para la seguridad del proceso de carga

2.4.1 Análisis teórico

La decisión de usar una batería de plomo y ácido, como se verá más adelante, implica la necesidad de escoger un cargador de batería que regule el paso de corriente y permite que el proceso de carga se realice de forma segura y eficaz.

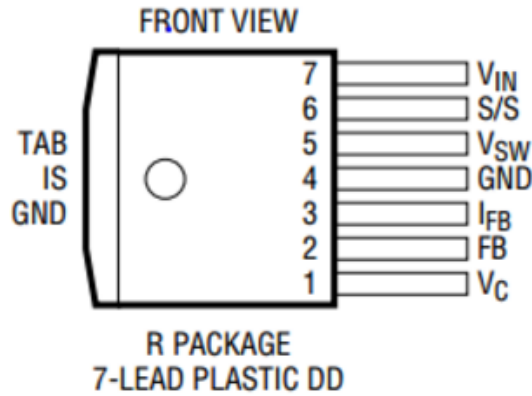


Ilustración 24: Plano de LT1513

El cargador que se empleará en este diseño se propone por *Linear Technology* y se conoce como LT1513. Se adjunta el *datasheet* completo en el Anexo B. Sin embargo la Ilustración 20 presenta la forma que este adquiere y a continuación, la Ilustración 21 muestra el circuito aconsejado para su empleo.

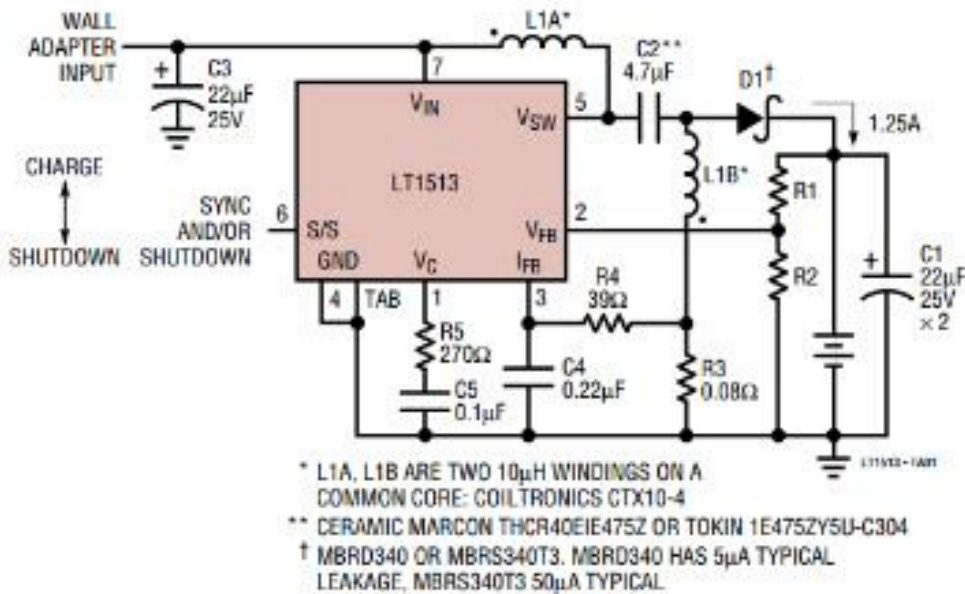
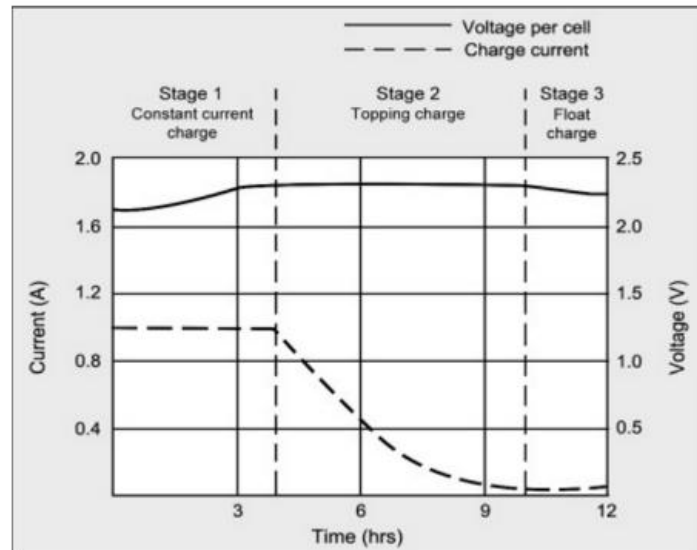


Ilustración 25: Circuito recomendado para LT 1513

Para el proceso de carga, se mantendrá la tensión de entrada (que se corresponde con la tensión de salida del convertor DC-DC estudiado en secciones anteriores) fija a 15 V mientras que la salida dependerá del nivel de carga de la batería como se ilustra a continuación. La corriente se mantendrá a 1.25 A como se comprueba a partir de la Ilustración 21.



Stage 1: Voltage rises at constant current to V-peak.
Stage 2: Current drops; full charge is reached when current levels off
Stage 3: Voltage is lowered to float charge level

Ilustración 26: Gráfica de voltaje según el nivel de carga

2.5 Inversor

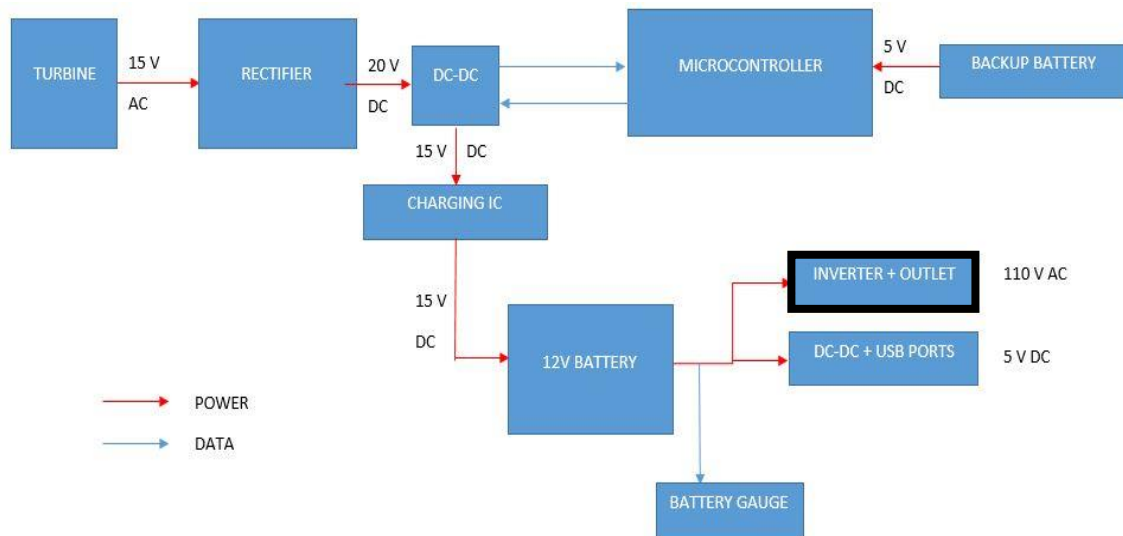


Ilustración 27: El inversor permitirá obtener una salida a 110 V, 60 Hz

2.5.1 Análisis teórico

Probablemente, el inversor es la parte más compleja del proyecto a primera vista. Un inversor es un elemento de electrónica de potencia que, a grandes rasgos, convierte una señal continua en una alterna, es decir, se trata de un convertidor DC-AC.

Un inversor es usado en múltiples ámbitos como motores eléctricos con control de velocidad, fuentes de energía ininterrumpidas o aplicaciones de energía alterna desde una batería de un coche.

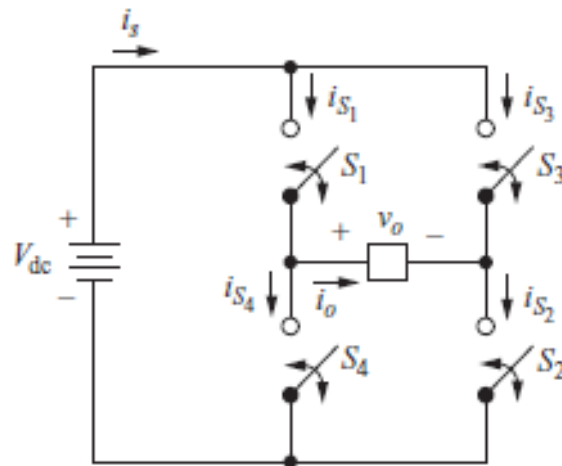


Ilustración 28: Esquema típico de un inversor de Puento integral

Existen múltiples configuraciones para lograr el objetivo de conseguir una onda alterna a partir de una fuente de continua, pero un esquema sencillo y accesible, el cual se usará en este proyecto es el presentado en la Ilustración 23.

El principio de funcionamiento consiste en alternar los interruptores dos a dos de forma que en cada ciclo la carga vea una tensión positiva durante la mitad y negativa durante la otra mitad. De esta forma se consigue una señal de salida cuadrada de tensión alterna.

De esta forma, como se explica en la Ilustración 24, cuando los interruptores S_1 y S_2 están activos, la tensión a través de la carga es V_{dc} mientras que cuando son S_3 y S_4 los que se activan, la tensión a través de la carga, tomando el mismo criterio, será $-V_{dc}$.

Para analizar lo que sucede a la corriente que fluye por la carga y la energía consumida por la misma, se hará uso de la herramienta de la serie de Fourier. Sin componente continua en la salida la tensión y corriente se pueden escribir como:

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_o t + \theta_n) \quad (20)$$

$$i_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_o t + \phi_n) \quad (21)$$

De la forma también se puede escribir la potencia consumida por la carga como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} I_{n_{rms}}^2 R \quad (22)$$

donde

$$I_{n_{rms}}^2 = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (23)$$

Y en el caso de una onda cuadrada, las series de Fourier contienen los armónicos impares y se puede escribir la tensión de salida como:

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin n\omega_o t \quad (24)$$

Como se ha mencionado anteriormente, el esquema que se usará en este proyecto es el de un inversor de puente integrado como se muestra en la siguiente Ilustración.

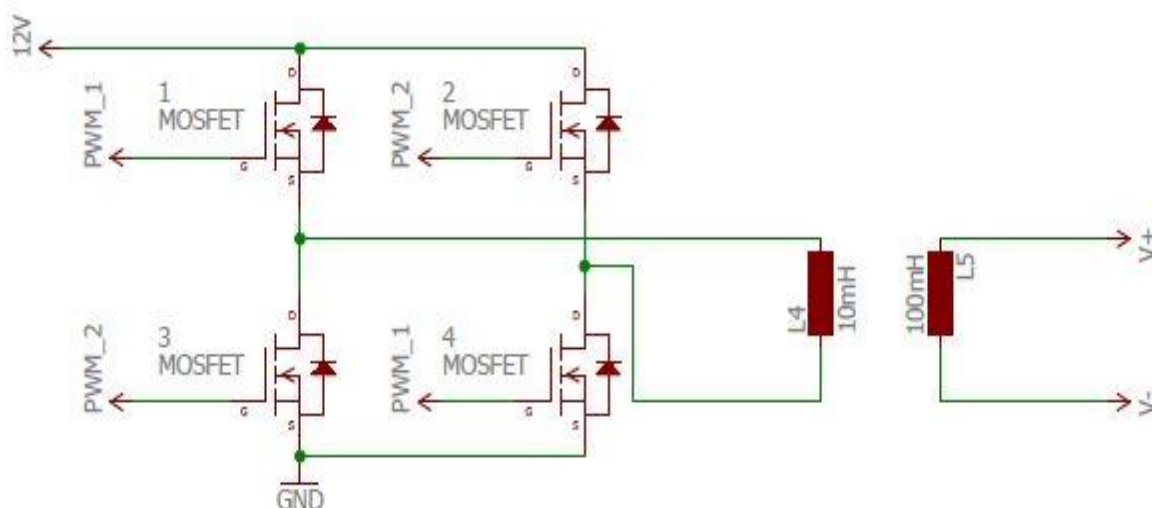


Ilustración 29: Esquema del inversor

Se usarán cuatro MOSFET que actuarán de forma complementaria dos a dos para producir una tensión alterna cuadrada en el lado primario del transformador representado en la imagen como L4.

2.5.2 Simulaciones

Se llevó a cabo la simulación del inversor mostrado en el esquema mediante el software matemático *Matlab*. Se programaron los MOSFET de forma que la señal que le llega a la carga sea similar a un PWM que actúe como una señal senoide en el transformador. Los resultados se muestran en la siguiente Ilustración.

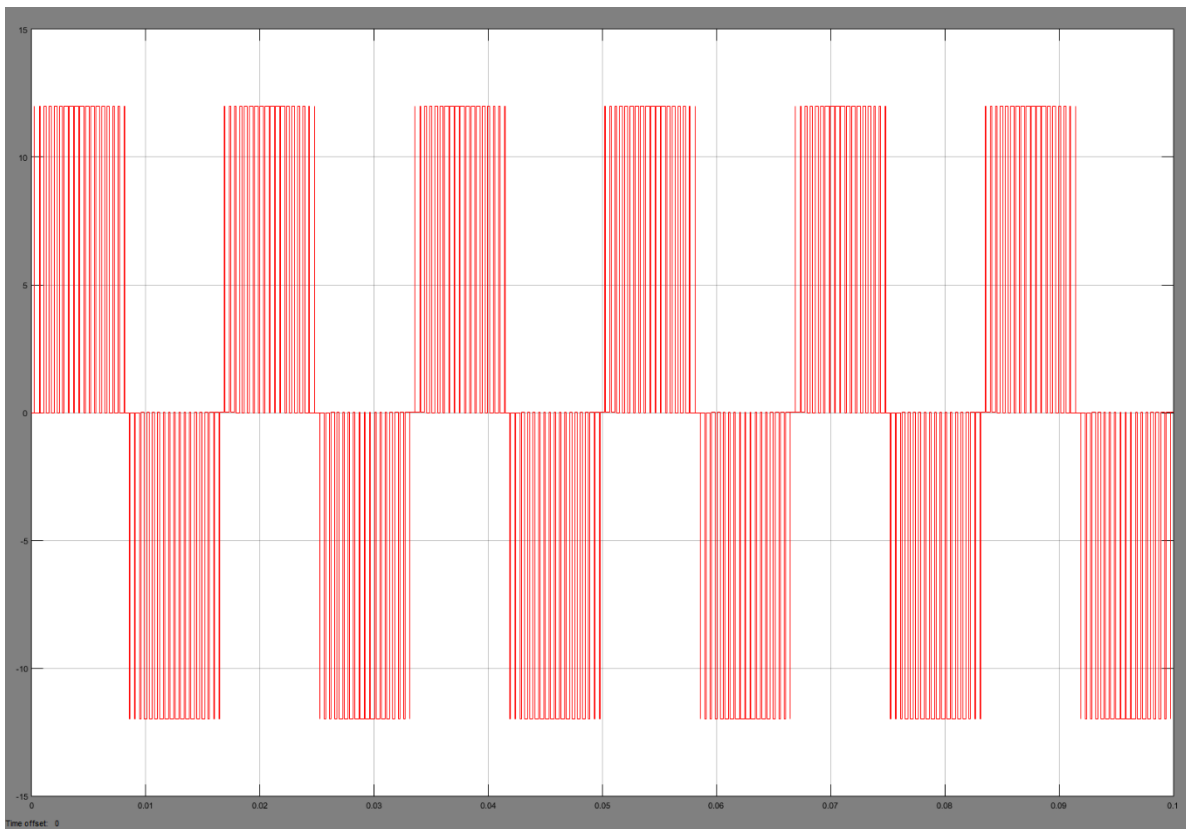


Ilustración 30: Tensión a la salida del inversor

2.6 Placa de circuito integrado

2.6.1 Análisis teórico

Para promover la manejabilidad y la capacidad del módulo de la batería de ser portátil y poder usarse, una vez que la batería está cargada, de forma remota a la turbina eólica que alimenta la batería, todo el diseño se ensamblará en una placa con un circuito integrado de unas dimensiones diminutas que, además, mejoran las prestaciones ofrecidas por una *breadboard* que no llega a las características requeridas para este proyecto.

Con el fin de hacer probaturas y estudiar por partes el correcto funcionamiento del proyecto global, se separarán las partes dentro de la placa y se interconectarán mediante cables externos que no disturben en gran medida el orden del diseño.

El software que se empleará para el diseño de los circuitos y las conexiones es la versión 7.5.0 de EagleCad, un programa informático de diseño que permite escoger entre una gran variedad de elementos estandarizados y ajustarlos en una base que a continuación se construirá por el fabricante (en este caso la propia tienda de la universidad).

El proceso se basa en un diseño inicial de lo que se conoce como un esquema, en el que de forma gráfica se colocan los elementos interconectados de forma que representen el circuito que se colocará después en la placa. Una vez que el esquema toma forma y las conexiones se han llevado a cabo de forma lógica y ordenada se procede a darle forma en lo que se conoce como la *board*. En esta, los elementos se representan tal y como su forma real indica. Las conexiones se mantendrán tal y como se diseñaron en el esquema y las dimensiones de la placa se podrán ajustar de forma que dé cabida a todos los elementos necesarios asilándolos con unos márgenes de seguridad.

Una vez que se colocan los elementos y siguiendo las conexiones ya establecidas, se procede a construir lo que se conoce como trazas. Consiste en crear las sendas por las que circulará la corriente en la realidad y ajustar el grosor según la intensidad en cada caso. Para una intensidad grande, como la que circulará por el circuito principal, se escogerá un grosor de 127 micras, mientras que para circuitos auxiliares por donde la intensidad será muy baja, se podrá reducir ese grosor a escasas micras.

Una de las ventajas que ofrece este software es que se pueden diseñar trazas en las dos partes de la placa, por encima y por debajo. Esto permite que conexiones muy agrupadas que necesitan sobreponerse pero pueden suponer un cortocircuito si lo hacen, puedan ejecutarse en la parte inferior y cruzarse sin peligro alguno.

Por último, se creará una tierra común para la placa con el fin de reducir al máximo el número de trazas y mejorar las prestaciones que ofrecerá la placa una vez construida.

Las partes que se construirán en la placa serán el rectificador, el inversor, el conversor DC-DC y el cargador de la batería.

2.6.2 Diseño de los esquemas

Cada parte se diseña por separado, pero en el mismo archivo para luego poder juntarse en una misma placa.

A continuación se muestran los esquemas en EagleCad de las diferentes partes que se ensamblarán en la placa:

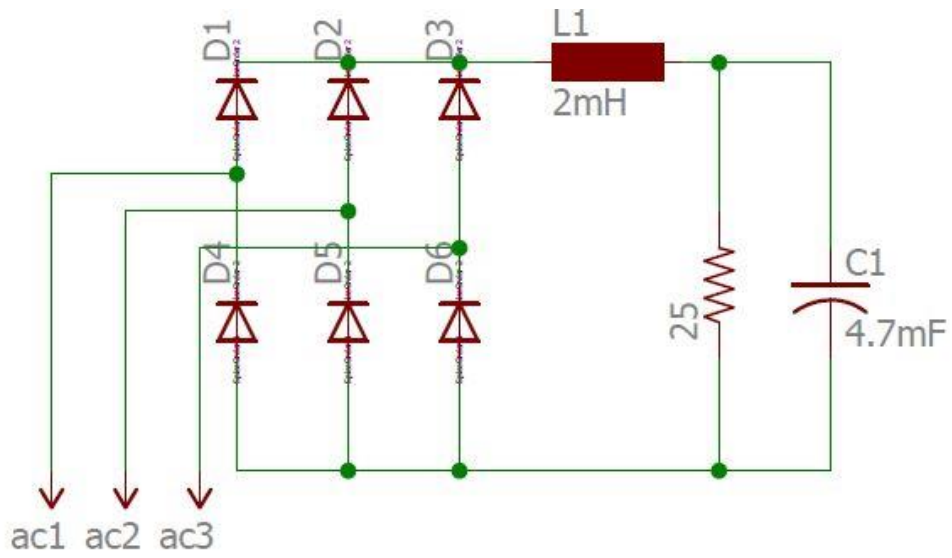


Ilustración 31: Esquema del rectificador trifásico en Eagle

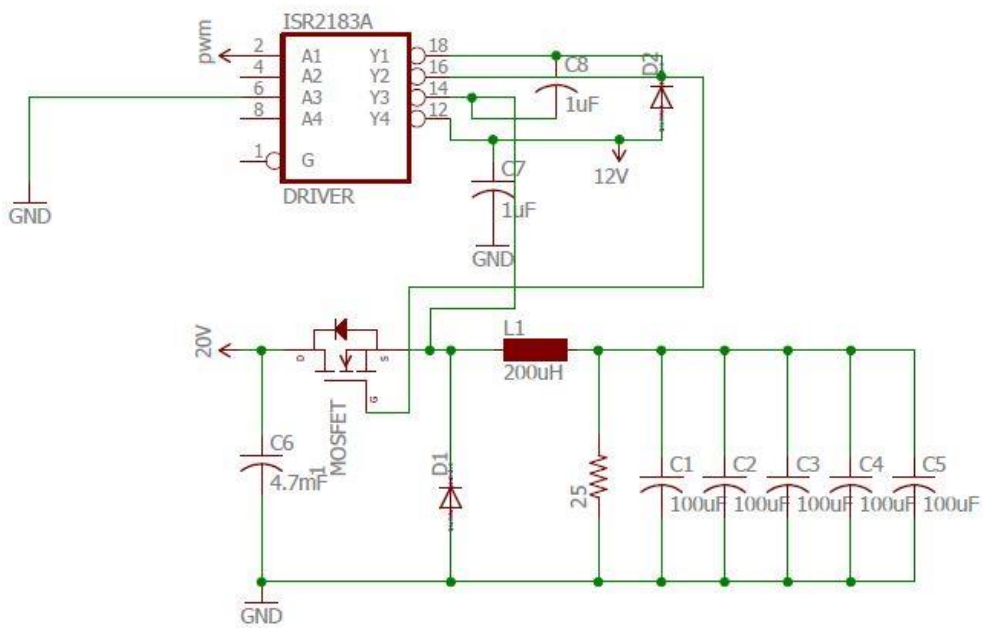


Ilustración 32: Esquema del convertor DC-DC en Eagle

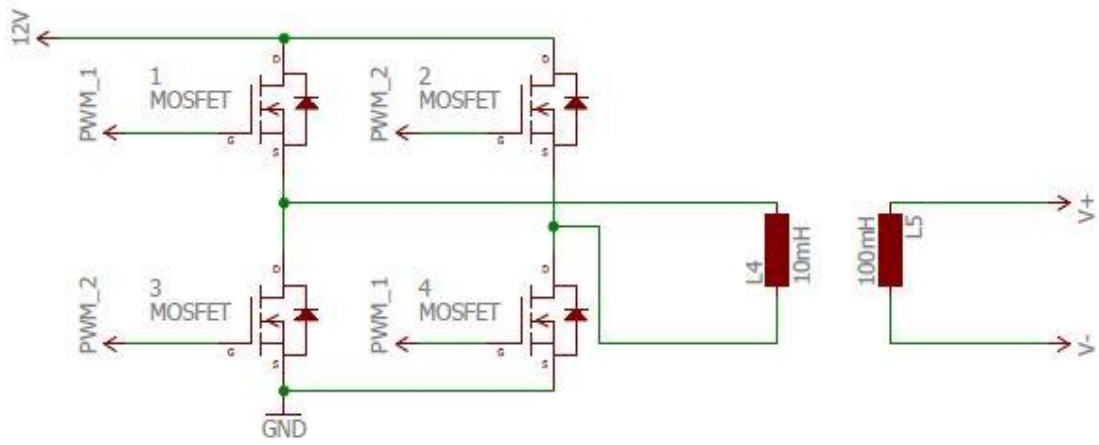


Ilustración 33: Esquema del inversor en Eagle

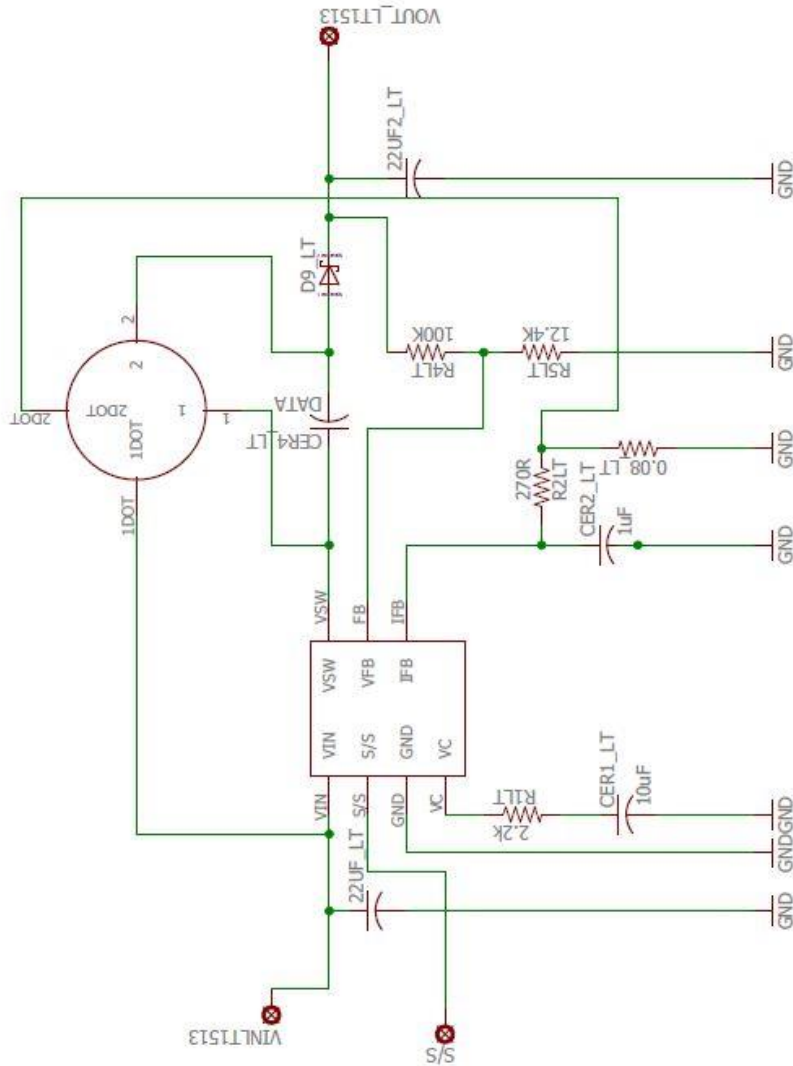


Ilustración 34: Esquema del cargador de la batería en Eagle

2.6.3 Diseño de la placa

Una vez establecidos los esquemas se trabajará en el menú *board*. Los elementos han de colocarse dentro de las dimensiones establecidas para la placa y se ordenarán de forma que las trazas respeten una distribución acorde a la circulación de intensidad en el circuito global.

A continuación se muestran imágenes del diseño final de la placa base desde el menú *board*.

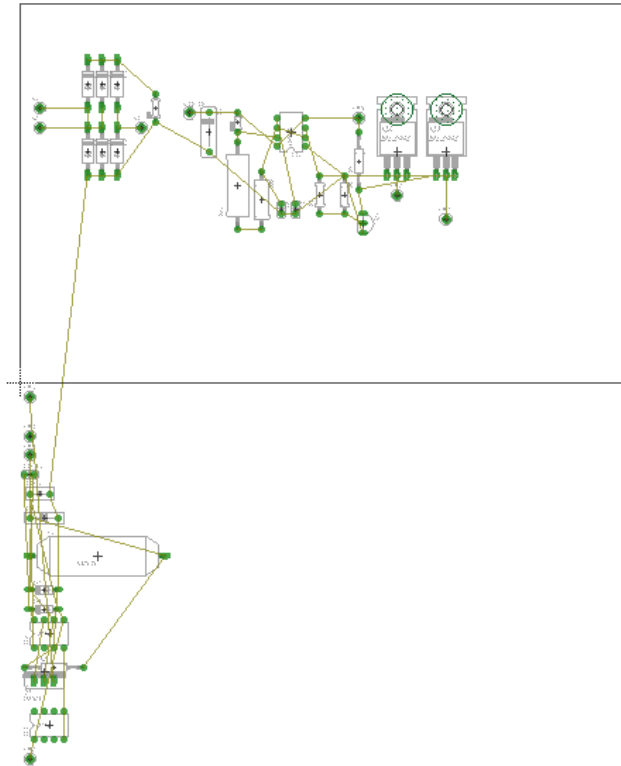


Ilustración 35: Menú *board* en Eagle

La Ilustración 27 muestra el menú *board* del software EagleCad. En él, los elementos dispuestos en los esquemas se colocan por orden de selección fuera de la placa base que la delimita el polígono de cuatro lados de la zona superior de la imagen. El objetivo es ordenar y disponer de forma adecuada todos los elementos dentro de ella para conseguir reducir la distancia entre elementos pero asegurando un margen de seguridad.

En la Ilustración 28 se representa la placa una vez reorganizada y colocada de forma lógica minimizando al máximo la distancia de las trazas (aunque en la imagen se han suprimido).

La zona superior izquierda se corresponde con el rectificador trifásico; la zona superior derecha la ocupa todo el circuito del inversor; abajo a la derecha está ocupado por el cargador de la batería y por último, la zona inferior izquierda es donde se sitúa el conversor DC-DC.

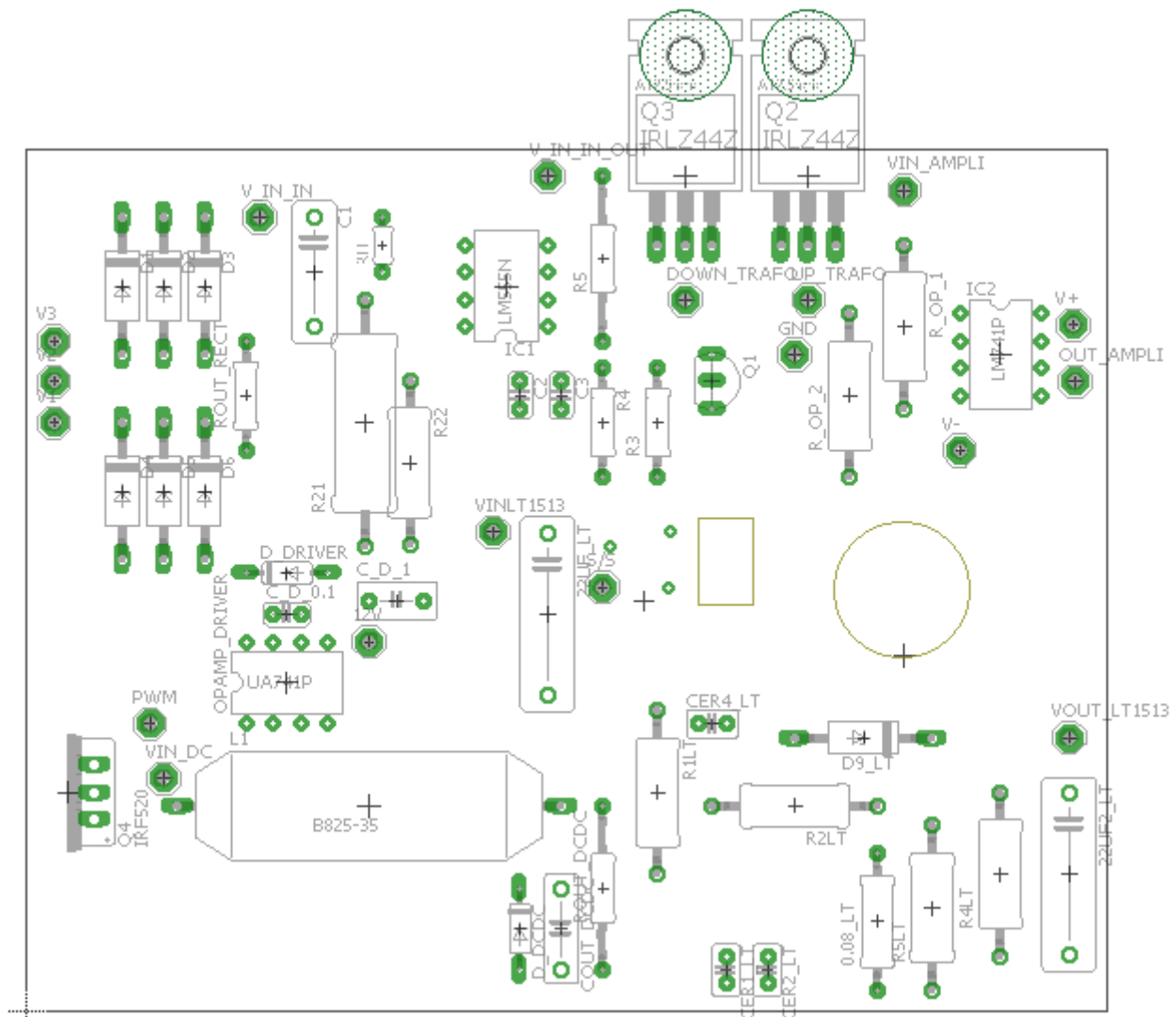


Ilustración 36: Vista completa de la placa organizada

Una vez que los elementos se han colocado dentro de la placa y se han organizado siguiendo un orden lógico, se procede a diseñar las trazas. Para ello se unen los elementos siguiendo las indicaciones que el propio software ofrece y manejando las trazas de la parte superior e inferior al criterio del diseñador para que no se superpongan dos trazas.

La Ilustración 29 representa esto último; la implementación de las trazas tanto de la parte superior (en rojo) como de la inferior (en azul) sin que haya ninguna superposición de las mismas. Una herramienta muy útil que presenta el programa es el buscador de errores ERC que, siguiendo unas indicaciones concretas dispuestas por el diseñador, detecta potenciales errores que pueden suponer fallos en el circuito una vez que la placa cobra vida.

Por último se añaden las vistas inferior y superior, respectivamente, de la placa junto con sus planos de tierra comentados anteriormente.

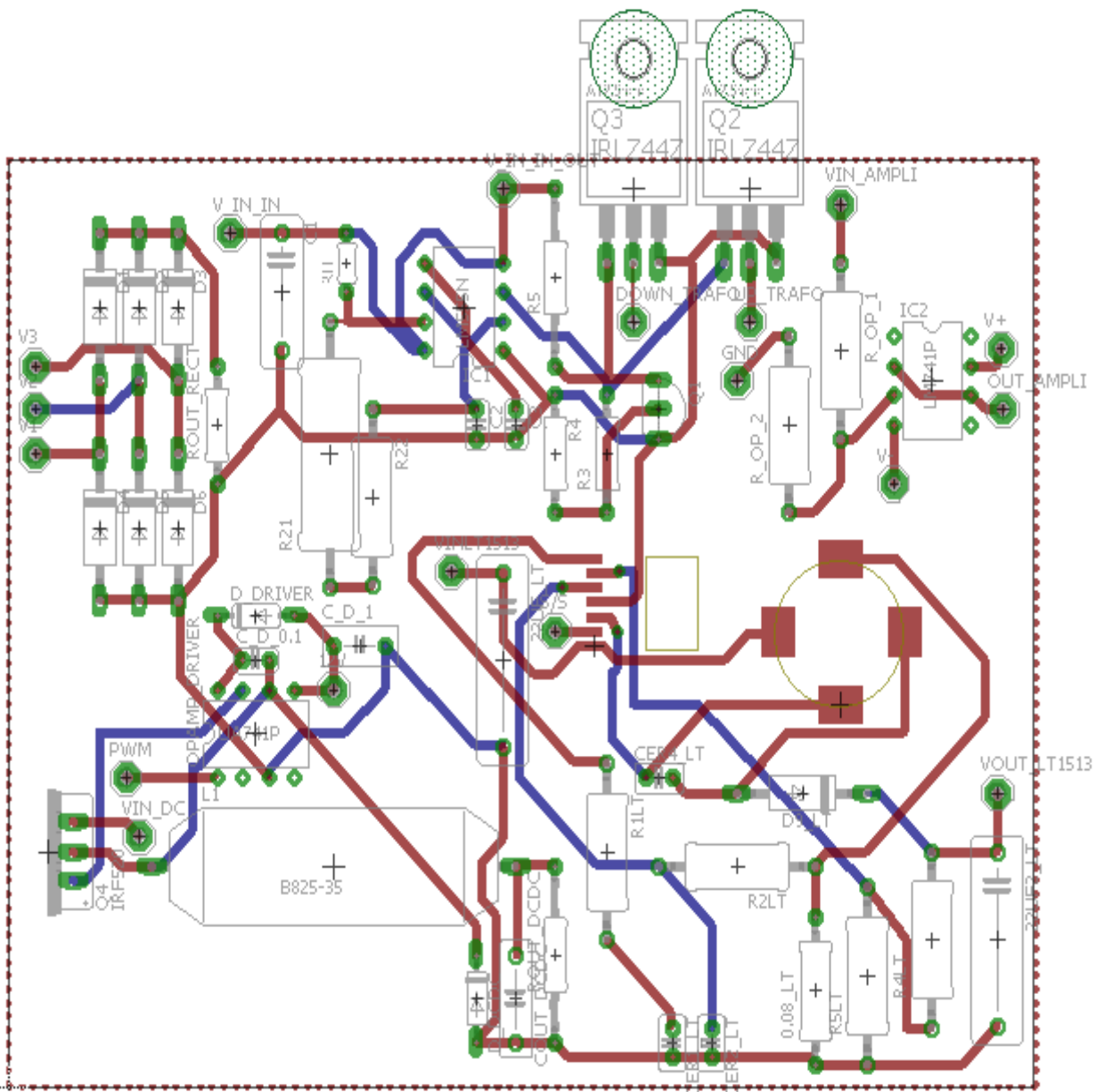


Ilustración 37: Diseño definitivo de la placa base

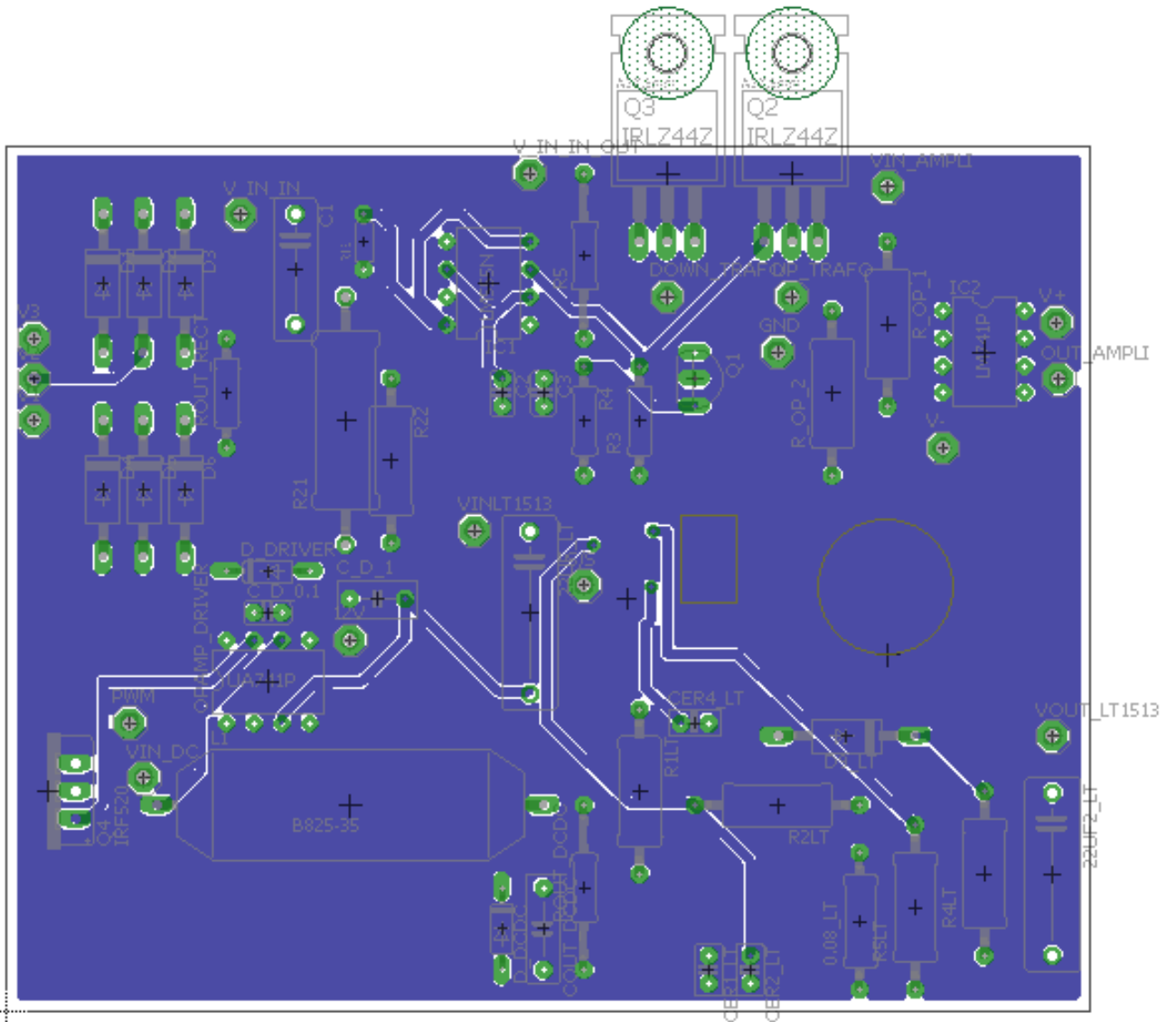


Ilustración 38: Vista inferior de la placa

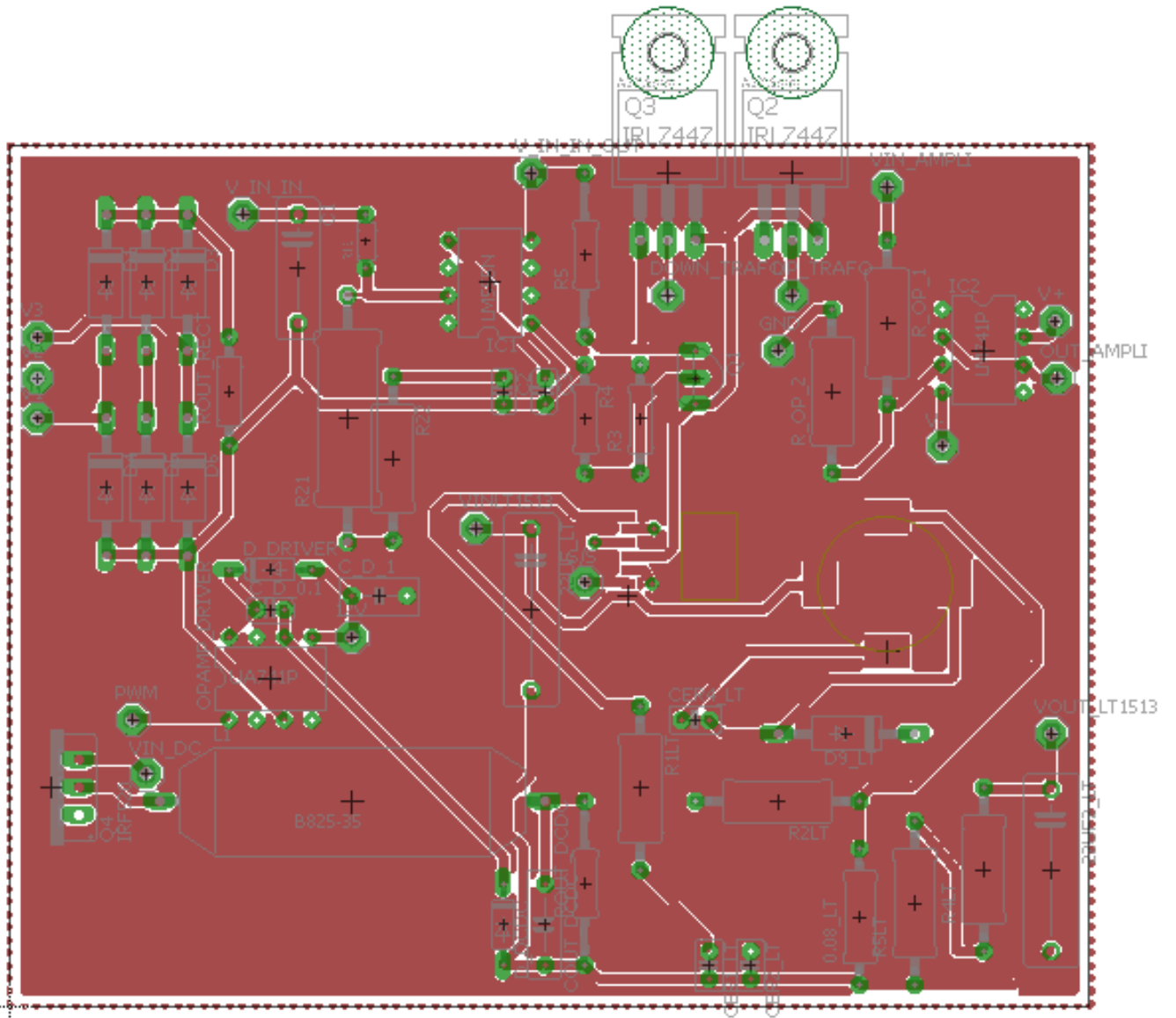


Ilustración 39: Vista superior de la placa

3-. Resultados

En esta sección se discutirá la puesta en práctica del proyecto, lo que incluye las complicaciones que han ido surgiendo durante las pruebas, los éxitos que han sucedido y las partes que por alguna razón (se concretará) no han podido salir adelante y se proponen como futuro trabajo en la continuación del proyecto.

3.1 Rectificador

3.1.1 Procedimiento

El rectificador trifásico se probó en el laboratorio de *Power Electronics* por la necesidad de una fuente trifásica que lo alimentara. Se conectó la fuente a un *Variac* y la salida a los fusibles de la entrada del rectificador. Se fue aumentando la tensión de entrada paulatinamente hasta alcanzar los 9 V entre fase y tierra que se suponían teóricamente en el motor a las 240 rpm estipuladas. Se conectó el sistema a un osciloscopio para medir la tensión de salida en la carga y al vatímetro que la banca trifásica incorporaba para comprobar que la intensidad se ajustaba a los valores esperados.

3.1.2 Resultados

Las siguientes ilustraciones muestran imágenes tomadas, primero del vatímetro que posee la propia banca trifásica y que mide, en este orden, tensión simple, intensidad de línea, potencia por cada línea y factor de potencia; y por otro lado del osciloscopio, que mide la tensión a través de la carga colocada a la salida del rectificador.



Ilustración 40: Medidas a la entrada del rectificador



Ilustración 41: Medidas a la salida del rectificador

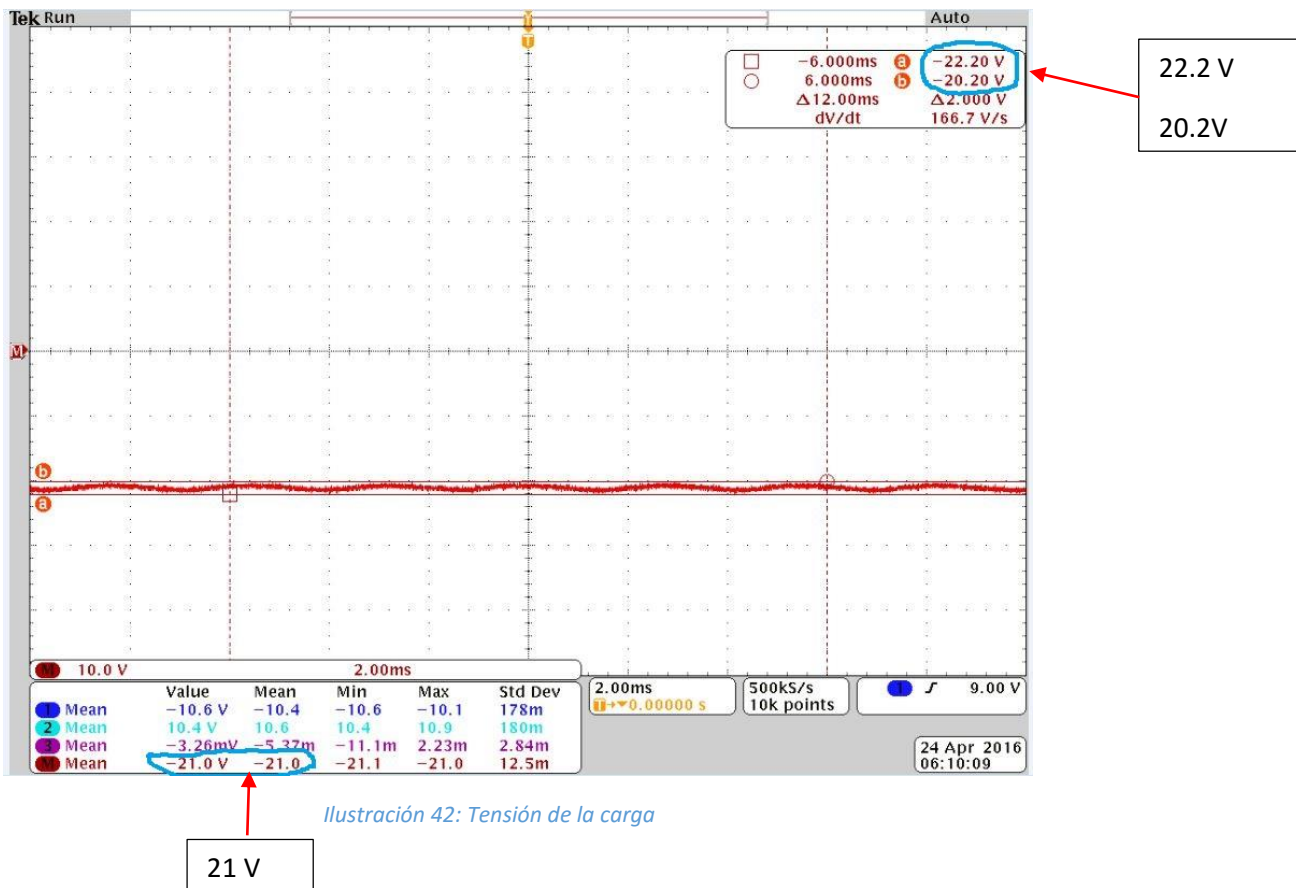


Ilustración 42: Tensión de la carga

3.1.3 Valoración

Se comprueba como los valores medidos coinciden con las especificaciones que se supusieron en el apartado de diseño. Con 9 V a la entrada como tensión simple se obtiene una señal de salida con una media de 21 V. Además, el rizado entra dentro de los requerimientos propuestos al inicio, siendo de 2 V, una cantidad que se puede eliminar por completo con el control iterativo que se implementará en el siguiente paso: el convertor DC-DC.

A partir de los números obtenidos de forma experimental, se procede al cálculo de la eficiencia que este rectificador trifásico mantiene:

$$\eta = \frac{45.048}{16.498 \times 3} = 91.017\% \quad (25)$$

Esta eficiencia se considera alta, dado que las únicas pérdidas que se producen son por el efecto Joule de cables y demás elementos y por las pérdidas debido a la caída de tensión en los diodos del puente integrado.

3.2 Conversor DC-DC

3.2.1 Procedimiento

Se conectó el conversor a una fuente de energía externa ajustada a 20 V para simular lo que sería la salida del rectificador en condiciones ideales. La señal PWM se obtendrá, de momento, desde un generador de señales ideal y el ciclo se ajustará al 75% de forma que a la salida se obtengan los teóricos 15 V que se necesitan para cargar la batería. Además, se alimentará al DRIVER con 12 V generados desde la segunda salida de la misma fuente de tensión.

3.2.2 Resultados

Se tomaron capturas de las medidas tomadas por la propia fuente de energía. Para prevenir intensidades altas, en esta prueba intermedia se usó una resistencia para colocarla como carga de 37Ω y como se comprueba, la intensidad que circula es apenas 0.3 A. La segunda captura se corresponde con el osciloscopio que mide la salida del conversor y que simula la entrada a la batería.



Ilustración 43: Medidas de la fuente de energía



Ilustración 44: Medida del osciloscopio a la salida del conversor

3.2.3 Valoración

Con un ciclo del 75% se espera una tensión de salida de 15 V y se comprueba cómo, según las medidas que muestra el osciloscopio, la tensión de salida se queda en escasos 12.75 V. Esto puede suponer un serio riesgo si lo que se coloca a la salida no es una resistencia sino una batería. Un nivel insuficiente de voltaje para cargarla puede llevar a condiciones peligrosas y al malfuncionamiento de la misma.

Es por lo explicado antes, que se hace imprescindible un control que mantenga el ciclo al valor necesario, ya que el valor teórico es inadecuado y además, logre estabilizar la tensión de salida ante cualquier perturbación externa.

Basando los cálculos en resultados experimentales, se puede estimar la eficiencia que este conversor mantiene, mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{12.745^2/37}{20.0 \times 0.247} = 88.9\% \quad (26)$$

La potencia de salida se calcula como la tensión de salida al cuadrado entre la carga, mientras que la potencia de entrada se calcula a partir de la tensión e intensidad medidas en la fuente de energía.

3.3 Microcontrolador

3.3.1 Procedimiento

En primer lugar se montó un circuito auxiliar muy simple, basado en dos resistencias y un condensador para la comprobación de que *Arduino* es capaz de leer de forma correcta la tensión de salida cuando esta es mayor de 5 V, mediante un divisor de tensión.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de este circuito auxiliar, se conectó al convertidor y este, al generador de señales de forma que la entrada sea una señal compuesta con 21 V de corriente continua junto con una señal alterna de 1 V de amplitud, de forma que se simule el efecto del rizado que se obtiene por efecto del rectificador trifásico.

3.3.2 Resultados

Se siguió el siguiente orden para la toma de medidas: en primer lugar se probó con la señal compuesta explicada antes para comprobar el funcionamiento del control y en segundo lugar se bajó la componente continua de la señal de 21 V a 17 V para ver la modificación del ciclo del PWM. Los resultados se muestran en las dos ilustraciones que prosiguen a este párrafo.

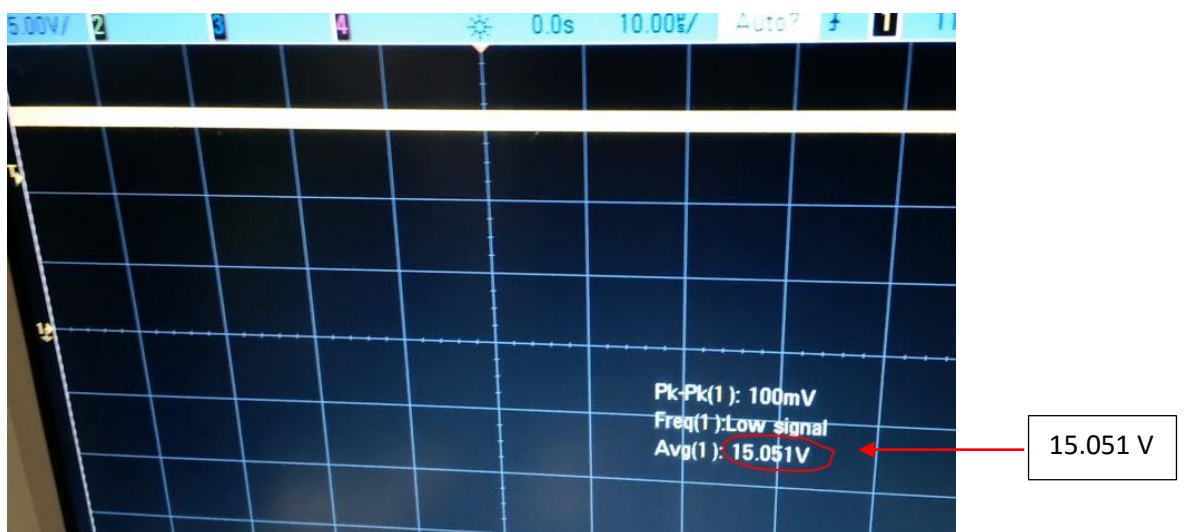


Ilustración 45: Tensión de salida con 21 V de componente continua

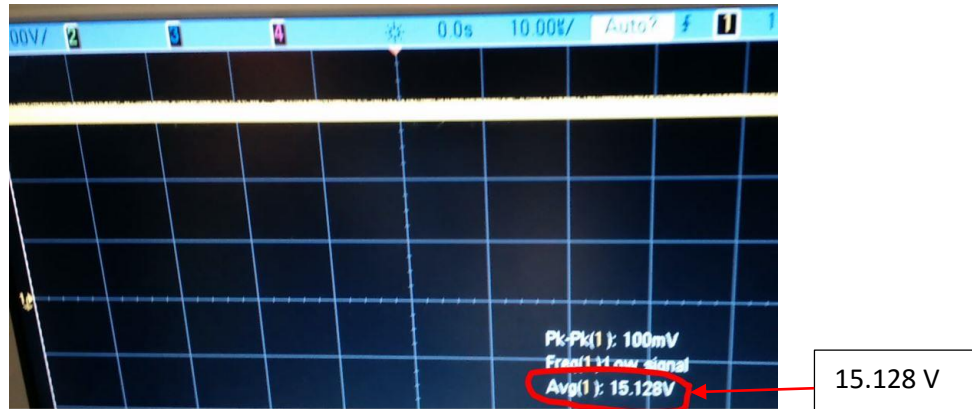


Ilustración 46: Tensión de salida bajando a 17 V de componente continua

3.3.3 Valoración

En primer lugar, lo que más llama la atención de las medidas tomadas en la sección anterior es cómo el control funciona de manera óptima. Ante una perturbación el control es capaz de ajustar los parámetros oportunos para mantener en 15 V constantes la salida.

Además, incluso cuando la tensión baja de manera brusca desde 21 V hasta 17 V de componente continua, obligando al ciclo a colocarse en más del 85%, el control es capaz de ajustarlo a la perfección y mantener esos 15 V continuamente.

Otro detalle es la mejora de la eficiencia en casi un 1% como se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{15.128^2/30}{20.01 \times 0.426} = 89.5\% \quad (27)$$

Como valoración final se puede declarar que el bloque compuesto por el conversor DC-DC y el microcontrolador es un éxito y que funciona a la perfección.

3.4 Inversor

3.4.1 Procedimiento

Para el inversor, en primer lugar se diseñó un circuito auxiliar usando una puerta lógica de forma que se consigan dos señales PWM invertidas y cuando una sea LOW la otra sea HIGH y viceversa, para conseguir que los MOSFET actúen de forma complementaria. Una vez que se tienen los dos PWM trabajando como deben, se conectan a los DRIVER de los MOSFET y como carga se colocará, primeramente, una simple resistencia. Una vez que la tensión de salida sea una onda cuadrada, se conectará el transformador y se medirá la tensión en el lado de alta.

3.4.2 Resultados

Se tomaron capturas del osciloscopio que medía la tensión de la carga cuando se conectó el transformador a la salida y se muestran en la siguiente Ilustración:

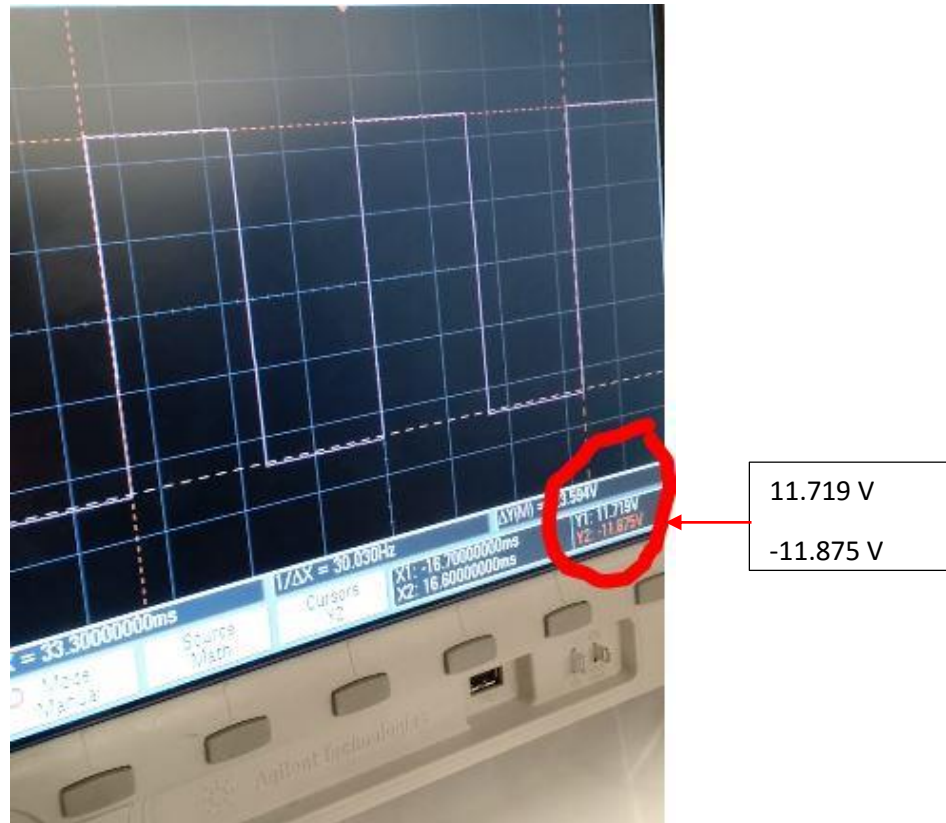


Ilustración 47: Tensión de salida en el lado de baja del trafo

3.2.3 Valoración

La señal del lado de baja coincide con lo esperado; una onda cuadrada de 12 a -12 V con frecuencia 60 Hz. Sin embargo, al conectar el transformador y medir el lado de alta no se obtiene la señal que debería y no funciona correctamente.

Por ello la valoración final no es del todo exitosa y deberá ser propuesta una solución en la próxima sección de conclusiones.

4-. Conclusión

4.1 Resumen final

Se llegó a la conclusión del proyecto con la valoración clara de que se ha llenado un vacío en el itinerario eléctrico de ICAI. Conocer fundamentos de electrónica de potencia es de gran utilidad, ya que mueven grandes campos en el mundo de la ingeniería electromecánica.

Es por ello que este proyecto ha contribuido a la formación académica en gran medida, pues ha servido para, no solo adquirir conocimientos teóricos del ámbito, sino también para ponerlos en práctica con un diseño que cobra vida y se pueden hacer simulaciones y comprobaciones por igual usando herramientas del mundo ingenieril.

En general, han sido más las valoraciones y los resultados positivos que han permitido adquirir una idea completa del diseño y han sido algunos aspectos concretos, únicamente, los que no han salido como dictaba la teoría. Por consiguiente, se añade una sección más adelante acerca del trabajo futuro y de las posibles soluciones para esas minucias que no han resultado exitosas.

4.1.1 Éxitos

En cuanto a los resultados que han sido logrados de forma eficaz en el proyecto se puede destacar la integración casi completa tanto del rectificador trifásico junto con el convertidor y el control, lo que connota a la parte que influye en la carga de batería como satisfactoria.

En el lado de descarga, el inversor funciona correctamente; los puertos USB y las salidas son capaces de alimentar cualquier elemento electrónico que se conecte a ellas; el medidor de batería se ajusta a la tensión en cada etapa del proceso de carga de la batería.

En resumen, el proyecto, casi al completo, tiene funcionalidad, ejecuta las funciones que se le supone, integra los componentes que lo componen, cumple con la inmensa mayoría de requisitos planteados al inicio del proyecto como se puede estudiar en el Anexo C, carga la batería con seguridad, está dotado de la portabilidad que se planteó en el inicio y sobre todo es capaz de alimentar equipos electrónicos que se conectan en las diferentes salidas de las que se ha dotado.

4.1.2 Incertidumbres

Sin embargo, hay algunos aspectos que por varias razones no fructificaron y se quedaron sin ser efectivos en el diseño definitivo.

En primer lugar, no se consiguió implementar el cargador de la batería en la placa. Se demostró su funcionalidad en la *breadboard* básica, haciendo cargar la batería en condiciones de seguridad, pero al soldar los elementos en la placa no se pudo completar. El trabajo de soldadura que se requiere para integrar los elementos en la placa es minucioso y muy vulnerable a cualquier error que, por mínimo que sea, puede arruinar el resto del circuito. Este ha sido el fundamental problema en este apartado.

Además, el transformador no logró ser del todo eficaz para conseguir los 110 V, 60 Hz. Sí que se logró una señal cuadrada alterna que alimentaba los dispositivos electrónicos, pero el proceso de carga no era el adecuado y se dejó de cargarlos para evitar daños internos. La solución a este problema es añadir un filtro a la entrada del transformador que mejore la distorsión armónica de la onda cuadrada y permita al transformador elevar la tensión de forma más segura.

4.2 Trabajo futuro

Una última sección dentro de la conclusión y valoración final del proyecto debe estar dedicado al futuro del proyecto; a la continuación que debe darse a este diseño y que permitirá globalizar una idea que, a priori, puede ser revolucionaria en el campo de la electrónica de potencia.

En primer lugar, el aspecto fundamental en el que más investigación se propone es en el de devolver energía a la red. Para conseguir esto hay que cumplir unas determinadas características y, en especial, sincronizarse a la frecuencia de la red. Una vez hecho esto, las posibilidades que se abren son inmensas. La energía sobrante de cargar la batería e incluso la energía generada cuando la batería está liberada de forma portátil, puede ser devuelta a la red y cobrar para recuperar poco a poco la inversión inicial del proyecto.



Ilustración 48: El Net Metering permite devolver energía a la red

Otro aspecto a tener en cuenta en el proyecto es el ajuste de la turbina eólica. Si bien es cierto que la suposición inicial son los 9 V a la entrada de este sistema a una velocidad de 240 rpm del motor, se puede, perfectamente, aumentar la velocidad del motor para aumentar la tensión de entrada sin comprometer en ningún momento la seguridad de las personas. Esto permitirá introducir mucha más energía en el sistema, lo que facilitará la carga de la batería e instará a desarrollar un proyecto nuevo que cubre una gama más amplia de necesidades domésticas a nivel electrónico.

Por último, se propone el diseño de un elemento que acoja todo el sistema electrónico de potencia explicado aquí, junto con las propuestas de investigación, tal como una caja de plástico o de otro material que no comprometa la conductividad de los circuitos internos pero que abarque el sistema completo para incrementar su manejabilidad y portabilidad.

La construcción hasta ahora de los elementos se realizó de forma aislada y sin aunarlos todo en un continente común. Es por ello que para su comercialización se insta al desarrollo de un elemento industrializable que se pueda construir en serie en cadenas de montaje en la industria moderna de la electrónica e potencia.

5-. Referencias

- [1] D. Hart, Power electronics. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [2] Battery University Charging Lead Acid, web page. Available at: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery. Accessed February 2016.
- [3] WindBlue Power DC-540 Alternator, web page. Available at: http://www.windbluepower.com/Permanent_Magnet_Alternator_Wind_Blue_Low_Wind_p/dc-540.htm. Accessed February 2016.
- [4] LT1513 Battery Charger, datasheet, Linear Technology, Corp., 1996. Available at: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1513fas.pdf>.
- [5] DC/DC and DC/AC PWM Converters, web page. Available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/dc-dc-and-dc-ac-pwm-converters.html>. Accessed March 2016.
- [6] IRS2183 Half-Bridge Driver, datasheet, International Rectifier, 2006. Available at <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irs2183.pdf>.
- [7] Arduino Based Switching Voltage Regulators, web page. Available at: <http://www.instructables.com/id/Arduino-based-Switching-Voltage-Regulators/>. Accessed April 2016.
- [8] F-260U Transformer, datasheet, Triad Magnetics, 2013. Available at: <http://catalog.triadmagnetics.com/Asset/F-260U.pdf>.
- [9] How to Design an Inverter, web page. Available at: <http://www.homemade-circuits.com/2013/03/how-to-design-inverter-basic-circuit.html>. Accessed April 2016.
- [10] IEEE Code of Ethics, web page. Available at: <http://www.ieee.org/about/corporate/governance/p7-8.html>. Accessed March 2016.

6-. Agradecimientos

Este apartado se centra en el reconocimiento a todas las personas de “University of Illinois at Urbana-Champaign” sin las que este proyecto no se hubiese podido llevar a cabo y que aportaron su paciencia y colaboración hacia el éxito de este diseño. En especial se reconoce:

1. **Kevin Colravy:** investigador del departamento de *Power Electronics* que controla el laboratorio eléctrico para la realización de todas las pruebas que se llevaron a cabo. Sin su ayuda y su consejo en muchos de estos intentos no se hubiese dispuesto de una fuente trifásica ni de fusibles especiales ni elementos imprescindibles para el correcto funcionamiento del proyecto.
2. **Zitao Liao:** experto en el área de *Power Electronics*, su consejo sirvió para descartar varios diseños en el inversor y a hacer funcionar el conversor DC-DC de la mejor forma posible. El MOSFET DRIVER es, en gran parte, mérito suyo.
3. **Katherine O’Kane:** como directora de nuestro proyecto, Katherine ha sido una pieza fundamental en el progreso y dedicación semana a semana con su apoyo constante y sus incontables aportes al desarrollo del proyecto. Especializada en el área de control, el diseño del código y la implementación apropiada en el conversor DC-DC se debe en parte a su conocimiento técnico de este campo.
4. **Jackson Lenz:** como asistente de profesor en la universidad, Jackson aportó todo el apartado de seguridad. Este proyecto requiere de grandes medidas de prevención y de seguridad por contar con una batería, la cual debe ser tratada mediante un protocolo determinado que él proporcionó. La toma de decisión del tipo de batería y el cargador adecuado para su correcto proceso de carga fue gracias a él.
5. **Thomas Galvin:** como profesor encargado de la asignatura, Thomas aportó perspectivas diferentes, puntos de vista distintos y alternativas a los enfoques iniciales para dotar al proyecto de un enriquecimiento imposible sin su ayuda.
6. **Jonathan Makela:** como jefe de departamento y de asignatura, fue el primer en instar a la consecución de este proyecto. Se mostró atento, especialmente sabiendo de la necesidad de tener un proyecto para España e hizo lo imposible por conseguir que reinase la comodidad y se lograra un éxito rotundo con el que regresar a ICAI.

Por último, se reconoce el esfuerzo por parte de toda la universidad de proveer a estudiantes e investigadores con las mejores de las facilidades e instalaciones posibles que hacen que

la “University of Illinois at Urbana-Champaign” esté en el elenco de las mejores universidades en ingeniería a nivel mundial.

DOCUMENTO N° 2:

**ANÁLISIS DE SEGURIDAD Y
RIESGOS**

Contenido

1- Introducción	74
2- Seguridad.....	74
2.1 Banco trifásico	74
2.2 Batería	74
2.3 Transformador.....	75
2.4 Salidas al usuario	75

1-. Introducción

Este Proyecto está desarrollado de forma que todos los elementos funcionen respetando unas condiciones estrictas de seguridad y de forma que no suponga ningún riesgo para el usuario el hecho de interactuar con la caja de baterías y poder favorecerse de la portabilidad del diseño de la forma más segura posible.

Por ello, se discutió en primer lugar, los focos de riesgo potencial, es decir, aquellos sistemas que, por diferentes causas, puedan suponer un riesgo a tener en cuenta y que debe de hacerse un esfuerzo extra para lidiar con ellos.

Se concluye que dichos focos de riesgo se sitúan en el banco trifásico, la batería, el transformador y las salidas a las que tiene acceso el usuario (USB, enchufes etc).

2-. Seguridad

2.1 Banco trifásico

El riesgo de manejar el banco trifásico se encuentra al manejar corrientes de hasta 3 A que pueden suponer la muerte cuando no se siguen unas condiciones de seguridad básicas. Por ello es conveniente aplicar unas normas básicas y unas soluciones para este problema.

Este riesgo se solventó mediante tres fusibles colocados a la salida del banco, limitados a 6 A que, en caso de cortocircuito peligroso o cualquier situación que pueda poner en riesgo la integridad de las personas humanas, actúen para soliviantar el problema y asegurar la protección de los participantes.

2.2 Batería

Sin duda alguna, la batería es el foco de riesgo fundamental de este proyecto. El malfuncionamiento de la batería, así como el proceso de carga de la misma puede derivar en la liberación de elementos tóxicos al ambiente, fuego o incluso en ciertas condiciones, explosión.

Una vez identificados los riesgos del mal uso de una batería, se procede a prevenirlos aplicando las alternativas que más convengan en cada situación.

En primer lugar, todo aquel proyecto que lidie con el proceso de carga o descarga de una batería deberá pasar primero un examen de seguridad, de forma que los participantes reconozcan haber entendido los posibles riesgos que conlleva el tratamiento de una batería sea del tipo que sea. Dicho examen se adjunta en el Anexo.

Entre las pautas más importantes que se pueden destacar de ese informe están:

1. Justificar al departamento que el proyector requiere de una batería
2. Determinar los componentes químicos que compondrán la batería
3. Obtener documentos de seguridad. En este caso, obtener el MSDS y el *datasheet* de la batería.

4. Buscar un cargador de batería comercial. En este caso el LT 1513
5. Simular el circuito en *LTSpice*
6. Lograr la aprobación por parte de tu director de proyecto
7. Crear el circuito en una *protoboard* y validar el funcionamiento sin batería
8. Realizar la prueba con la batería delante de tu director de proyecto

2.3 Transformador

El principal riesgo que supone el transformador es el alto voltaje que existe en el primario. En concreto el lado de alta está a 115 V, 60 Hz por lo que necesita unas condiciones de seguridad y protección. Las características completas del transformador que se usará en este proyecto se añaden en el Anexo D.

Cada prueba que involucrara el uso del transformador fue llevada a cabo en presencia de un experto en el área que supervisara las conexiones y se asegurase que ningún elemento se comprometía debido al alto voltaje. Además, a la salida del transformador se colocó un fusible con intensidad nominal de 1 A que actuase en caso de necesidad.

2.4 Salidas al usuario

El último foco de riesgo del proyecto tiene lugar a la salida del sistema, en los elementos con los que el usuario interactúa con la caja de baterías y conecta sus dispositivos electrónicos para aprovechar la energía almacenada.

Los puertos USB trabajan a 5 V y no consumen más de 0.2 mA por lo que su seguridad se basa exclusivamente en el aislamiento de partes activas que puedan suponer un cortocircuito o la exposición a tensión directa.

Los enchufes que se disponen funcionarán a 110 V, 60 Hz como maneja la red en Estados Unidos. Un alto voltaje que necesita algún sistema de protección. La ventaja es que los enchufes han sido elegidos dentro de un catálogo comercial y ya llevan inherentes un sistema de aislamiento y otro de limitación de corriente que hace seguro su uso en todo momento.

El indicador de batería funciona con intensidades mínimas y no necesita de un especial cuidado en términos de seguridad. De todas formas también llevo consigo un aislamiento eléctrico que lo protege y lo hace ajeno a exposiciones peligrosas.

DOCUMENTO 3:

PRESUPUESTO

Contenido

1- Inversión inicial.....	81
2- Coste de los elementos	82
3- Mano de obra	83

En este documento se presentará un análisis detallado de los aspectos económicos; desde la inversión inicial, hasta el coste de la mano de obra para calcular la estimación del presupuesto del proyecto.

En cuanto a la inversión inicial, se tendrá que cubrir el gasto del acomodamiento del lugar para situar los elementos necesarios. Se dispondrá de una serie de cables subterráneos que conecten la turbina eólica, que se situará en la zona exterior, con la caja de baterías, en las que se ha centrado este informe, que se presupone en el interior. Además se costearán los elementos que integran la caja de baterías, estimándose en \$153.

Por la otra parte, para cubrir la mano de obra se asumirá un salario medio por hora de \$30, un número de horas estimado para el desarrollo del proyecto se estimarán en 150 y por último, existirá un factor multiplicador de 2.5 que incluye los beneficios del ingeniero por el diseño de este proyecto junto con el costo de la mano de obra para la instalación del proyecto.

1-. Inversión inicial

La siguiente tabla recoge la inversión inicial del proyecto para su acomodamiento.

Elemento	Precio unitario (\$)	Cantidad	Total (\$)
Cables de conexión	1.24	4	4.96
Fusibles	0.75	6	4.50
Recipiente del sistema	16.65	1	16.65
Equipo de excavación	124.35	1	124.35

Lo que hace que el presupuesto inicial para este proyecto sea de \$150.46

2-. Coste de los elementos

El coste de los elementos viene detallado en la siguiente ilustración:

Module	Item	Part Number	Vendor	Unit cost \$	Quantity	Total cost \$	
Rectifier	Schottky diode	SB360-E3/54	DIGIKEY	0.50	6	3.00	
	Inductor	DENO-23-0001	DIGIKEY	3.38	1	3.38	
	Capacitor	UVR1E472MHD	DIGIKEY	1.43	1	1.43	
	Fuse	SSQ5	DIGIKEY	0.37	3	1.11	
	Fuse Holder	BK/1A5600	DIGIKEY	0.64	3	1.92	
Rectifier Total						10.84	
Buck converter	Mosfet	IRF520PBF	DIGIKEY	0.95	1	0.95	
	Mosfet driver	IRS2183STRPBF	DIGIKEY	1.16	1	1.16	
	Driver diode	SB360-E3/54	DIGIKEY	0.50	1	0.50	
	Driver capacitor	T350A105K035AT7301	DIGIKEY	0.24	2	0.48	
	Buck diode	SB360-E3/54	DIGIKEY	0.50	1	0.50	
	Inductor	70F204AI-RC	DIGIKEY	1.26	1	1.26	
	Output capacitor	35ZLH100MEFC6.3X11	DIGIKEY	0.30	5	1.50	
	Load Resistor	SQP500JB-30R	DIGIKEY	0.56	1	0.56	
	Measure capacitor	TAP106M025CRW	DIGIKEY	0.38	1	0.38	
	Measure resistor	RNMF14FTC3K00	DIGIKEY	0.10	1	0.10	
	Measure resistor	CF14JT27K0	DIGIKEY	0.10	1	0.10	
	Buck converter Total						7.49
	Inverter	Mosfet	IRF520PBF	DIGIKEY	0.95	4	3.80
Mosfet Driver		IRS2183STRPBF	DIGIKEY	1.16	4	4.62	
Driver Diode		SB360-E3/54	DIGIKEY	0.50	4	2.00	
Driver Capacitor		T350A105K035AT7301	DIGIKEY	0.24	8	1.92	
Not Gate		SN74LS04N	DIGIKEY	0.69	1	0.69	
Transformer		F260-U	TRIAD MAGNETICS	42.00	1	42.00	
Inverter Total						55.03	
Microcontroller	Arduino Uno		ECE SHOP	23.00	1	23.00	
Microcontroller Total						23.00	
Battery charger	Capacitor input/output	50YXJ22MTA5X11	DIGIKEY	0.51	2	1.02	
	Capacitor pin 3	UVR2AR22MDD	DIGIKEY	0.23	1	0.23	
	Capacitor pin 5	400PX4R7MEFCTA8X11.5	DIGIKEY	0.46	1	0.46	
	Resistor pin 1	CFM12JT270R	DIGIKEY	0.10	1	0.10	
	Resistor pin 3	CFM12JT39R0	DIGIKEY	0.10	1	0.10	
	Resistor pin 2	CW0054K000JE73	DIGIKEY	0.41	2	0.82	
	Resistor 0.08 Ohms	MSR3-0R08F1	DIGIKEY	0.91	1	0.91	
	Diode	SB360-E3/54	DIGIKEY	0.50	1	0.50	
	Inductor	CTX10-3-R	MOUSER	6.54	1	6.54	
		LT1513	LT1513IR#PBF	LINEAR TECHNOLOGY	0.00	1	0.00
	Battery charger Total						10.68
Battery bank	Battery gauge	PRO36FRC	AMAZON	16.00	1.00	16.00	
	USB ports	BT-081-0158	ADV.DESIGNS	10.00	1.00	10.00	
	12 V Battery 35Ah	BSL1075	RAKUTEN	19.59	1.00	19.59	
Battery bank Total						45.59	
Grand Total						152.63	

3-. Mano de obra

Se incluirá en la siguiente tabla el coste correspondiente tanto para el ingeniero que diseña este proyecto como para la mano de obra que se encarga de la instalación del dispositivo.

NOMBRE	SALARIO POR HORA	NÚMERO DE HORAS	TOTAL = SALARIO POR HORA*2.5 *NÚMERO DE HORAS
Marcos Rived	\$30	150	\$11,250
TOTAL	\$30	150	\$11,250

De esta forma, el presupuesto total del sistema electrónico de potencia para una turbina eólica asciende a **\$11,553.09**

DOCUMENTO N° 4:

TÉRMINOS ÉTICOS

1-. Consideraciones

Este proyecto se ha llevado a cabo en dirección a los intereses de la mayoría y hacia un futuro donde la energía renovable ocupe una plaza de relevancia en el uso diario. Se busca proponer una forma de acceso a energía para personas que, por múltiples razones, no pueden tener acceso a una red eléctrica para abastecerse en ese momento. Una aplicación interesante es para países en vías de desarrollo sin una red a nivel regional o nacional y que son dependientes de generadores aislados. Esta idea cubre esas necesidades y la intención legítima es dar una solución a un problema común.

De la misma forma, se busca que esas personas vivan en un ambiente que no les prive de usar aparatos, electrodomésticos u otros usos que requieren de energía eléctrica para funcionar. Todo esto se aferra inequívocamente al “IEEE Code of Ethics” que se añade en el Anexo E y cuyo primer apartado afirma:

- “to accept responsibility in making decisions consistent with the safety, health, and welfare of the public, and to disclose promptly factors that might endanger the public or the environment”

Este Proyecto se caracteriza por ser de confianza y eficiente. Esto incluye la transparencia de enseñar al usuario la cantidad de energía restante en la batería, así como la certeza de que los elementos se han ensamblado de forma que no hay ningún comportamiento extraño y que todos los elementos duran lo que se estipula teóricamente.

Además, las lecturas de información al usuario serán de la máxima precisión y calidad de forma que no caigan en error bajo presión. Esto está conforma a la regla número 3:

- “to be honest and realistic in stating claims or estimates based on available data”

Este concepto, junto con la concepción del aprovechamiento de energía eólica, es un campo de mucha investigación y que centra gran atención en el entendimiento a gran escala, pero no tanto a pequeña escala como es el propósito de este proyecto: hacer de la energía eólica un bien de uso doméstico y extendido globalmente.

A medida que este proyecto se presenta, futuras generaciones se beneficiarán de todo el trabajo y el desarrollo expuesto para proseguir en el objetivo de un futuro de energía limpia. Esto responde ante la regla número 5:

- “to improve the understanding of technology; its appropriate application and potential consequences;”

Se declara en esta sección la apropiada intencionalidad de todas las decisiones que han ido surgiendo durante el desarrollo de este proyecto sobre todo en las elecciones en cuanto a aspecto de diseño de elementos. Esto necesitó de críticas constructivas y consejo por parte de algunas fuentes tales como profesores, investigadores, libros etc. Como ejemplo de consulta se cita al investigador de electrónica de potencia Kevin Colravy y al experto en el mismo campo Zitao Liao.

Solo en el caso de que el trabajo sea aprobado por aquellos especialistas en la materia, se podrá evaluar este proyecto como un éxito. Esto responde ante la regla número 7:

- “to seek, accept, and offer honest criticism of technical work, to acknowledge and correct error and to credit properly the contributions of others.”

Por último, se considera un Sistema apto para todo aquel que lo necesite. Por lo tanto no se discriminará y/o se hará preferencia de ningún modo. El objetivo último del diseño es ayudar a la gente, independientemente de las circunstancias que lo acompañen. Esto responde ante la regla número 8:

- “to treat fairly all persons and to not engage in acts of discrimination based on race, religion, gender, disability, age, natural origin, sexual orientation, gender identity, or gender expression;”

DOCUMENTO N° 5:

ANEXOS

ANEXO A: Datasheet DRIVER IRS 2183

IR Rectifier

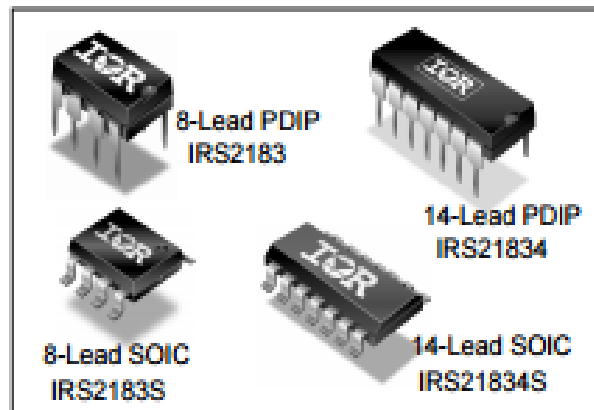
IRS2183/IRS21834(S)PbF

HALF-BRIDGE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
- Fully operational to +600 V
- Tolerant to negative transient voltage, dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 V to 20 V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3 V and 5 V input logic compatible
- Matched propagation delay for both channels
- Logic and power ground +/- 5 V offset
- Lower dI/dt gate driver for better noise immunity
- Output source/sink current capability 1.4 A/1.8 A
- RoHS compliant

Packages



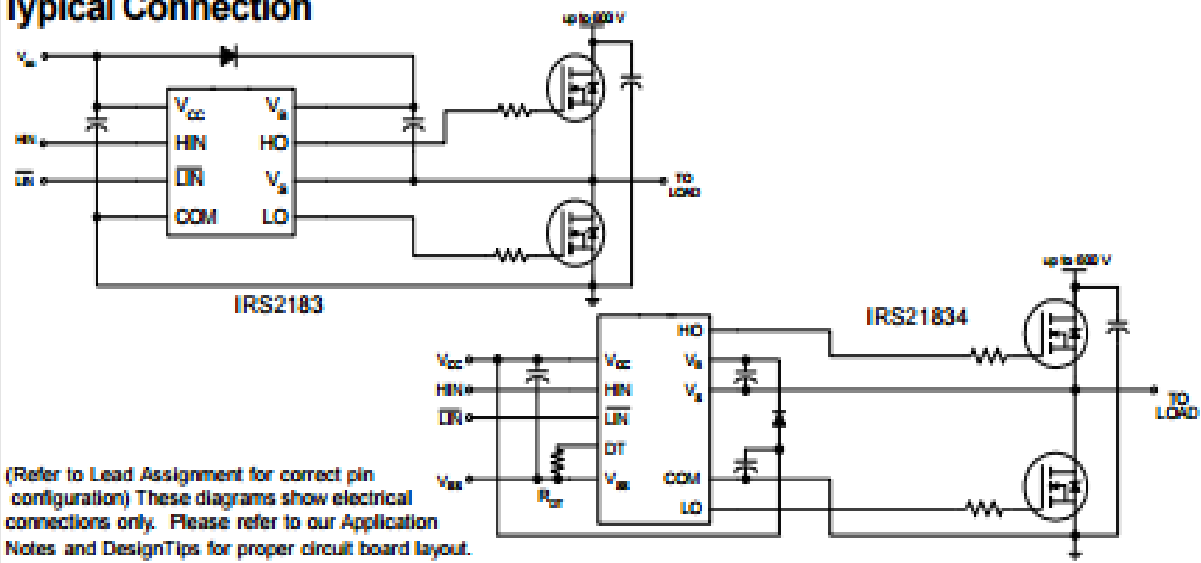
Description

The IRS2183/IRS21834 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with dependent high-side and low-side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. The logic input is compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3 V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high-side configuration which operates up to 600 V.

Feature Comparison

Part	Input logic	Cross-conduction prevention logic	Deadtime (ns)	Ground Pins	Temp/Ref (ns)
2181	HIN/LIN	no	none	COM	1800/20
21814				V _{DD} /COM	
2183	HIN/LIN	yes	Internal 400	COM	1800/20
21834				Program 400-5000	
2184	IN/SD	yes	Internal 400	COM	6800/70
21844				Program 400-5000	

Typical Connection



ANEXO B: Código Completo del control

```
//Timer del PWM
#define TIMER_TOP_1 100 // f=(F_CPU/TIMER_TOP_1)

// Máximo ciclo
#define MAX_DUTY_0A 0.95

//Referencia
const int desiredFeedbackVoltage = 1000;
const float percentVoltage = desiredFeedbackVoltage/1100.0;
const int desiredFeedback = percentVoltage*1023;

// Inicialización
const int minOutput = 0;

// Resolución
#define TIMER_RESOLUTION_0 255
#define TIMER_RESOLUTION_2 255

//Máximo valor del PWM
const int maxOutput0a = TIMER_RESOLUTION_0 * MAX_DUTY_0A;

int output0a;
int feedback0a;

#define FEEDBACK_PIN_0A 0
```

```
void setup(){
TCCR0A = _BV(COM0A1)|_BV(COM0B1)|_BV(WGM01)|_BV(WGM00);

analogReference(INTERNAL);// Referencia interna a 1.1 V

//Inputs
pinMode(FEEDBACK_PIN_0A,INPUT);

pinMode(6,OUTPUT);

// Inicializar el ciclo
OCR0A = minOutput;

ICR1 =TIMER_TOP_1;
}

void loop(){

// Lecturas
feedback0a = analogRead(FEEDBACK_PIN_0A);

output0a= setOutput(output0a,feedback0a,maxOutput0a);

// Actualizar
OCR0A =output0a;

}

// Ejecutar
```

```
int setOutput(int currentOutput,int feedback,int maxOutput){  
    if(feedback > desiredFeedback && currentOutput >minOutput){  
        currentOutput--;  
    }  
  
    else if(feedback < desiredFeedback && currentOutput <maxOutput){  
        currentOutput++;  
    }  
  
    return currentOutput;  
}
```

ANEXO C: OBJETIVOS

<u>Requirement</u>	<u>Verification</u>	<u>Points</u>
<p>1-. Rectifier</p> <p>Input: three-phase voltage 10 Vrms</p> <p>Output: 20V DC (+/- 1V), 3 Amps (+/- 0.4A), Based on expected RPM</p> <p>Rated Power: 60W</p> <p>Efficiency: over 90%</p>	<p>a) Connect the rectifier to the generator or a three-phase output from ECE Service shop to obtain 10 Vrms phase voltage.</p> <p>b) Connect a resistor of 40 Ohms that draws 0.5 Amps DC at the output along with a filter of 30 mH to filter it out</p> <p>c) Measure output voltage across the load with a two-channel oscilloscope and check it is 20 V DC with a ripple of +/- 1 V and +/-0.4 A</p>	<p>Connections (1)</p> <p>Output voltage 20V DC (5)</p> <p>Output current 3 Amps DC (3)</p> <p>Ripple accords with requirement (4)</p> <p>Efficiency over 90% (2)</p> <p>Total 15</p>
<p>2-. DC-DC Converter: Buck-converter (20V->15V DC)</p> <p>Rated Power: 60W</p> <p>Over 85% efficient</p> <p>Governed by a PI controller</p>	<p>a) Connect to a regulated DC power source in the lab.</p> <p>b) Set offset 20 Volts and sinusoidal wave of 0.3 V Amplitude.</p> <p>c) The load will be a 100 Ohms 2W resistor to test it.</p> <p>d) Measure the output current with a two-channel oscilloscope along with the output voltage across the load</p> <p>e) Display in Arduino Serial the measured output voltage as well</p>	<p>Connections (0.5)</p> <p>Driver is correctly switched (2)</p> <p>Applying an input of 20 DC the output is 15 V +/-0.5V (3)</p> <p>Efficiency >85% (2)</p> <p>Total 7.5</p>

	<p>as the signal after the PI to check error = 0</p>	
<p>3-.Battery bank: Battery gauge displays correct charge (+/- 0.2 V compared to volt meter)</p> <p>4.2 Battery Bank operates in a 77° F environment</p>	<p>a) With a backup battery we supply 15V and 2 Amps and check that the gauge reflects the battery is charging</p> <p>b) Fully charged, connect a load of 5 Ohms at the output of the batteries and check that the gauge reflects now they are discharging at 3 Amps constantly</p> <p>c) Measure the time with a cell phone chronometer it takes to charge a quarter of the battery and extrapolate for full-time charge to check whether is reasonable</p> <p>d) Routinely make sure area surrounding battery is not too hot</p>	<p>Voltage measurements are correct (2.5)</p> <p>Gauge measurements are correct (3)</p> <p>Time of charging is less than 20 hours (1)</p> <p>Temperature < 77°F at any time (1)</p> <p>Total 7.5</p>
<p>4-.DC/DC-USB Ports at 5 Volts DC, ~0.7A</p> <p>5.1 Inverter-Three-pin outlet at 110 V AC, ~1A</p> <p>5.1.1 Transformer 10V->110V AC</p>	<p>a) Connect power supply to the inverter 12V DC(for AC outlets) and USB ports (for DC outlets)</p> <p>b) Measure voltage across USB ports with a two-channel oscilloscope and confirm it is 5V +/- 0.2V DC, ~0.7A each</p> <p>c) Measure voltage across pin outlets with a two-channel oscilloscope and check it is 110V +/-2V AC, ~1.2A</p> <p>d) Isolate Transformer, supply 12V AC using function generator,</p>	<p>Connections (1)</p> <p>USB ports supply 5V 0.7A each (3)</p> <p>Voltage across the pin outlets is 110V AC (3)</p> <p>Transformer ratio is correct (0.5)</p> <p>Total 7.5</p>

	measure output of 120V AC using oscilloscope (+/- 0.5 V).	
<p>5-. Microcontroller:</p> <p>Configures the duty cycle for the buck converter by means of a time-response controller</p>	<p>a) Isolate the buck converter for testing</p> <p>b) Supply the converter with a sinusoidal wave of amplitude 1 volt and an offset of 20 volts (similar to the output of the rectifier)</p> <p>c) Measure the output voltage after running the ARDUINO code and ensure that it still remains at 15 volts regardless of any disturbances</p> <p>d) Display in the Serial port of Arduino the signal after the PI to make sure that error in steady-state equals 0</p>	<p>Arduino code has no mistakes(1)</p> <p>Output equals 15 Volts for the input signal (3)</p> <p>Applying a disturbance by adding some amplitude to the sinusoidal wave, output remains constant (3)</p> <p>Error remains equal 0 in steady-state (0.5)</p> <p>Total 7.5</p>
<p>6-. Charging IC: Inputs 15V DC and outputs 15) (+/- 0.2V) DC @ approx 1.3 A (+/- 0.2 A)</p> <p>Charges Battery using Constant Current method</p>	<p>a) Use power supply to supply 15V DC to the IC</p> <p>b) Measure output using oscilloscope to confirm 15V and 1.3A with the desirable ripple</p> <p>c) Connect to battery to ensure proper charging method and confirm it with the battery gauge. Ensure by extrapolating one quarter of the charging time that time is reasonable.</p>	<p>Output is 15 Volts (2)</p> <p>Battery charges(2)</p> <p>Time is less than 20 hours for full charge (1)</p> <p>Total 5</p>

ANEXO D: DATASHEET CARGADOR BATERÍA



LT1513/LT1513-2

SEPIC Constant- or Programmable-Current/ Constant-Voltage Battery Charger

FEATURES

- Charger Input Voltage May Be Higher, Equal to or Lower Than Battery Voltage
- Charges Any Number of Cells Up to 20V
- 1% Voltage Accuracy for Rechargeable Lithium Batteries
- 100mV Current Sense Voltage for High Efficiency (LT1513)
- 0mV Current Sense Voltage for Easy Current Programming (LT1513-2)
- Battery Can Be Directly Grounded
- 500kHz Switching Frequency Minimizes Inductor Size
- Charging Current Easily Programmable or Shut Down

APPLICATIONS

- Charging of NiCd, NiMH, Lead-Acid or Lithium Rechargeable Cells
- Precision Current Limited Power Supply
- Constant-Voltage/Constant-Current Supply
- Transducer Excitation
- Universal Input CCFL Driver

DESCRIPTION

The LT[®]1513 is a 500kHz current mode switching regulator specially configured to create a constant- or programmable-current/constant-voltage battery charger. In addition to the usual voltage feedback node, it has a current sense feedback circuit for accurately controlling output current of a flyback or SEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter) topology charger. These topologies allow the current sense circuit to be ground referred and completely separated from the battery itself, simplifying battery switching and system grounding problems. In addition, these topologies allow charging even when the input voltage is lower than the battery voltage. The LT1513 can also drive a CCFL Royer converter with high efficiency in floating or grounded mode.

Maximum switch current on the LT1513 is 3A. This allows battery charging currents up to 2A for a single lithium-ion cell. Accuracy of 1% in constant-voltage mode is perfect for lithium battery applications. Charging current can be easily programmed for all battery types.

LT, LTC and LT are registered trademarks of Linear Technology Corporation.

TYPICAL APPLICATION

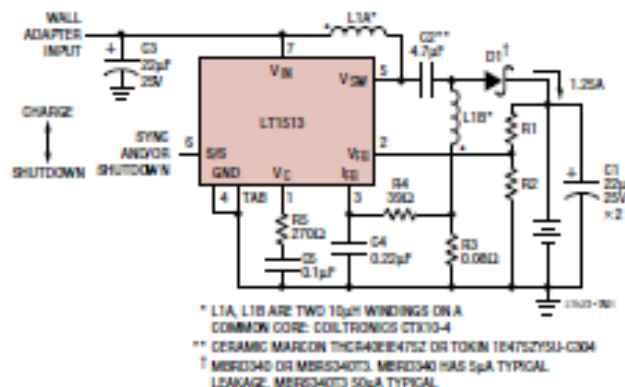
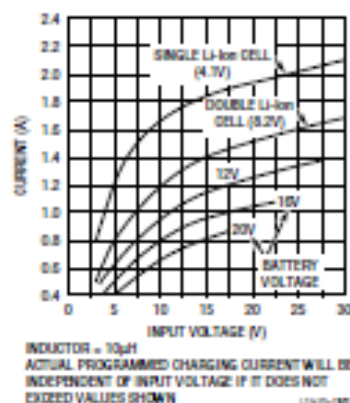


Figure 1. SEPIC Charger with 1.25A Output Current

Maximum Charging Current



LT1513/LT1513-2

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	30V	Operating Junction Temperature Range	
Switch Voltage	40V	LT1513C	0°C to 125°C
S/S Pin Voltage	30V	LT1513I	-40°C to 125°C
FB Pin Voltage (Transient, 10ms)	±10V	Short Circuit	0°C to 150°C
V _{FB} Pin Current	10mA	Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
I _{FB} Pin Voltage (Transient, 10ms)	±10V	Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	300°C

PACKAGE/ORDER INFORMATION

<p>R PACKAGE 7-LEAD PLASTIC DQ</p> <p>T_{MAX} = 125°C, R_{θJ} = 30°C/W</p> <p>WITH PACKAGE SOLDERED TO 0.5INCH² COPPER AREA OVER BACKSIDE GROUND PLANE OR INTERNAL POWER PLANE, R_{θJ} CAN VARY FROM 20°C/W TO >40°C/W DEPENDING ON MOUNTING TECHNIQUE</p>	ORDER PART NUMBER	<p>TT PACKAGE 7-LEAD TO-220</p> <p>T_{MAX} = 125°C, R_{θJ} = 30°C/W, R_{θC} = 4°C/W</p>	ORDER PART NUMBER
	LT1513CR LT1513CR-2 LT1513IR LT1513IR-2		LT1513CT7-2 LT1513IT7-2

Consult factory for Military grade parts.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_{IN} = 5V, V_C = 0.8V, V_{FB} = V_{REF}, I_{FB} = 0V, V_{SW} and S/S pins open, unless otherwise noted.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
V _{REF}	FB Reference Voltage	Measured at FB Pin	1.233	1.245	1.257	V
		V _C = 0.8V	1.228	1.245	1.262	V
	FB Input Current	V _{FB} = V _{REF}		300	550	nA
					600	nA
	FB Reference Voltage Line Regulation	2.7V ≤ V _{IN} ≤ 25V, V _C = 0.8V		0.01	0.03	%/V
V _{IREF}	I _{q3} Reference Voltage (LT1513)	Measured at I _{q3} Pin	-107	-100	-93	mV
		V _{FB} = 0V, V _C = 0.8V	-110	-100	-90	mV
	I _{q3} Input Current	V _{FB} = V _{IREF} (Note 2)	10	25	35	µA
	I _{q3} Reference Voltage Line Regulation	2.7V ≤ V _{IN} ≤ 25V, V _C = 0.8V		0.01	0.05	%/V
I _{qVOS}	I _{q3} Voltage Offset (LT1513-2) (Note 3)	I _{q3} = 60µA (Note 4)	-7.5	2.5	12.5	mV
		V _{FB} = V _{IREF}	-200	-10	0	nA
	V _{FB} Source Current	V _{IREF} = -10mV, V _{FB} = 1.2V	-700	-300	-100	µA
g _m	Error Amplifier Transconductance	A _{IC} = ±25µA	1100	1500	1900	µmho
			700		2300	µmho
		V _{FB} = V _{IREF} - 150mV, V _C = 1.5V	120	200	350	µA
	Error Amplifier Sink Current	V _{FB} = V _{IREF} + 150mV, V _C = 1.5V		1400	2400	µA

ANEXO E: IEEE CODE OF ETHICS

The following is from the IEEE Policies, Section 7 - Professional Activities (Part A - IEEE Policies).

♦ 7.8 IEEE Code of Ethics

We, the members of the IEEE, in recognition of the importance of our technologies in affecting the quality of life throughout the world, and in accepting a personal obligation to our profession, its members and the communities we serve, do hereby commit ourselves to the highest ethical and professional conduct and agree:

1. to accept responsibility in making decisions consistent with the safety, health, and welfare of the public, and to disclose promptly factors that might endanger the public or the environment;
2. to avoid real or perceived conflicts of interest whenever possible, and to disclose them to affected parties when they do exist;
3. to be honest and realistic in stating claims or estimates based on available data;
4. to reject bribery in all its forms;
5. to improve the understanding of technology; its appropriate application, and potential consequences;
6. to maintain and improve our technical competence and to undertake technological tasks for others only if qualified by training or experience, or after full disclosure of pertinent limitations;
7. to seek, accept, and offer honest criticism of technical work, to acknowledge and correct errors, and to credit properly the contributions of others;
8. to treat fairly all persons and to not engage in acts of discrimination based on race, religion, gender, disability, age, national origin, sexual orientation, gender identity, or gender expression;
9. to avoid injuring others, their property, reputation, or employment by false or malicious action;
10. to assist colleagues and co-workers in their professional development and to support them in following this code of ethics.

Changes to the IEEE Code of Ethics will be made only after the following conditions are met:

- Proposed changes shall have been published in THE INSTITUTE at least three (3) months in advance of final consideration by the Board of Directors, with a request for comment, and
- All IEEE Major Boards shall have the opportunity to discuss proposed changes prior to final action by the Board of Directors, and
- An affirmative vote of two-thirds of the votes of the members of the Board of Directors present at the time of the vote, provided a quorum is present, shall be required for changes to be made.

ANEXO F: PROTOCOLO DE SEGURIDAD

Safe Practice for Lead Acid and Lithium Batteries

Document Prepared By: Spring 2016 Course Staff
ECE 445: Senior Design Project Laboratory
Last Revised: April 18, 2016

I. INTRODUCTION

Hello senior designers! If you are reading this document, you are probably planning on designing a project using some form of battery! Batteries are a great way to store energy for later use in portable devices or backup systems. One often overlooked problem with batteries is that they are dangerous. Additionally, different batteries are dangerous for different reasons. In this document, we will challenge students to justify why they need a battery, introduce dangers inherent to all batteries, explain the dangers that are unique to two common types of batteries (lead-acid batteries and lithium batteries), present some suggestions for charging batteries, and end with a discussion of the ECE 445 procedures for minimizing the risks of projects involving batteries.

II. DO YOU NEED A BATTERY?

Due to the danger, the course staff would like to stress that students should *avoid batteries if at all possible and use the very nice voltage supplies that are provided at every single lab bench.*

III. DANGERS INHERENT TO ALL BATTERIES

To prevent runaway current, your batteries must always be stored in a secure location with the terminals covered by insulating material to ensure that there is absolutely no way that a short circuit can present itself. Both of these battery chemistries are capable of delivering unbelievably high currents (>5000A) and will overheat and possibly ignite (lead acid via ignition of evaporating hydrogen and lithium via decomposing cathode and eventual exposure to oxygen) if they become too hot. Additionally, proper ventilation should be allowed such that any gas can dissipate itself. If your circuit requires a battery, you must be able to demonstrate that your circuit will not have any conditions where a failure results in a short circuit.

IV. UNIQUE DANGERS OF LEAD ACID, SLA, GEL MAT, ETC. BATTERIES

Lead acid batteries are the same types of batteries in your car. They are very high capacity and capable of outputting tremendous amounts of current at a reasonably low voltage. As the name implies, they are full of lead (bad) and acid (also bad). What's worse, the acid inside of a non-SLA or non-Gel Mat battery is in a liquid form and these batteries have valves to allow vapors to evaporate from the battery, meaning they pose a severe risk of spewing acid everywhere (VERY bad). For these reasons, if your project involves a lead-acid battery of any type, you will be *REQUIRED* to find the Material Safety Data Sheet (MSDS) and data sheet for your battery before you can acquire the battery and you must keep this documentation in the large yellow binder in the Compliance Center. If possible, it is advised that students purchase a battery with protection against chemical spills (SLA is typically the most effective for student projects relating safety and cost) in order to minimize the risk of chemical leakage occurring.

V. UNIQUE DANGERS OF LITHIUM-ION, LITHIUM IRON PHOSPHATE, ETC. BATTERIES

Lithium batteries are the type of batteries found in your mobile phones and laptops. They are generally smaller and lighter than comparable capacity lead acid batteries, but they are also *substantially more flammable*. Unlike the lead acid battery where cell damage typically translates to reduced capacity, cell damage in a lithium battery translates to *a particularly nasty chemical fire*. Lithium Iron Phosphate batteries tend to be somewhat more fire resistant on account of different cathode material; however, they are still extremely flammable. For this reason, if you elect to use a lithium battery in any capacity, you will be required to complete additional fire safety and fire extinguisher training before proceeding with the course. Additionally, you will be required to incorporate some circuit to prevent your battery cell voltage from decaying below $3.0 \frac{V}{\text{cell}}$ ($2.5 \frac{V}{\text{cell}}$ for LiFePO_4) or exceeding $4.2 \frac{V}{\text{cell}}$ ($3.65 \frac{V}{\text{cell}}$ for LiFePO_4). Any charge or discharge tests must be performed while the battery is inside of one of the specially design lithium safety bags and an ammunition box and any protection or charging circuits must be approved by your TA AND one of the power-centric TAs before they are so much as tested on a breadboard. These procedures are in place in order to protect you, others, and the brand new ECEB from being reduced to a smoldering pile of ashes. ***IF YOUR BATTERY BEGINS TO SWELL, FEEL HOT OR MAKE FUNNY NOISES: disconnect the battery IMMEDIATELY and place it in a battery bag and ammunition box FAR AWAY FROM FLAMMABLE STUFF. You should then report the issue to your TA and a power-centric TA IMMEDIATELY either in person or via a phone CALL to dispose of the battery as soon as possible.***

Swollen Battery = Time Bomb

There are several ways to damage a lithium cell. They include:

- Over charge
- Over discharge
- Over current (charge or discharge)
- Excessive heat
- Internal or external short circuit
- Mechanical abuse

Always check the battery specifications before purchasing or using them!

To minimize the risk associated with lithium batteries, the following precautions should be followed:

- Written work instructions and checklists should be generated for testing procedures
- Remove jewelry that may accidentally short circuit the terminals
- All dented batteries should be disposed of immediately (Contact your TA AND Casey Smith (217)-300-3722; cjsmith0@illinois.edu))
- Cover all metal work surfaces with insulating material
- Batteries should be transported in non-conductive carrying trays
- Always ensure the the open circuit voltage is within the acceptable range for your battery

VI. CHARGING LEAD-ACID CHEMISTRY BATTERIES

Charging a lead-acid battery is a non-trivial task. The course staff strongly suggest that if you must build a charger, you use some kind of integrated circuit (IC) solution. Additionally, you must familiarize yourself with the battery's charge characteristic and maximum charging current. Lead-acid batteries are inherently safer than lithium chemistry batteries. While an overcharge or overdischarge will cause extreme damage to your battery, the damage will be limited to internal calcification of the plates, reducing your capacity to a fraction of what it originally was. For this reason, *the course staff strongly suggests that you use a lead-acid type battery if your project requires a battery and is not weight or size sensitive.*

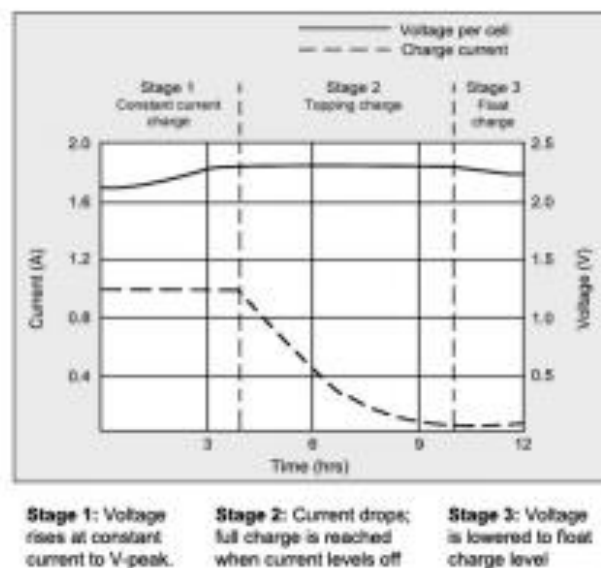


Fig. 1: The Generic Charging Characteristic of a Lead Acid Battery. [Source](#). PRINT OUT THE HYPERLINK

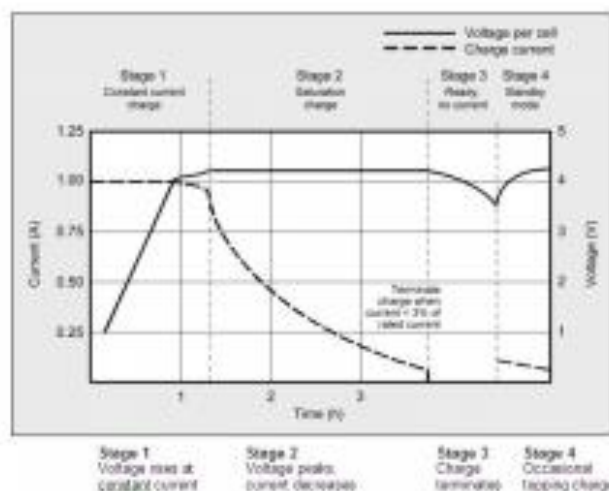


Fig. 2: The Generic Charging Characteristic of a Lithium Battery. [Source](#). PRINT OUT THE HYPERLINK

VII. CHARGING LITHIUM BATTERIES

Charging a lithium battery is also a non-trivial task. The course staff continue to strongly suggest that if you must build a charger, you use some kind of IC solution. You must also familiarize yourself with the charge characteristic and maximum charge current. *Any circuitry you design that involves a lithium battery must be approved by your TA AND one of the power-centric TAs before they are so much as tested on a breadboard.* As an addition, it is important to note that batteries, which we can model as ideal voltage sources, charge with ideal current sources. Having an ideal current source and voltage source in parallel with the load is fine! Problems arise if we instead have two voltage sources in parallel. Any mismatch in the voltage will break KVL, which leads to a sudden rush of current from one source to

the other in order to try and balance the voltages. This is a very unstable and hazardous methodology, therefore we always charge our batteries with current driving sources.

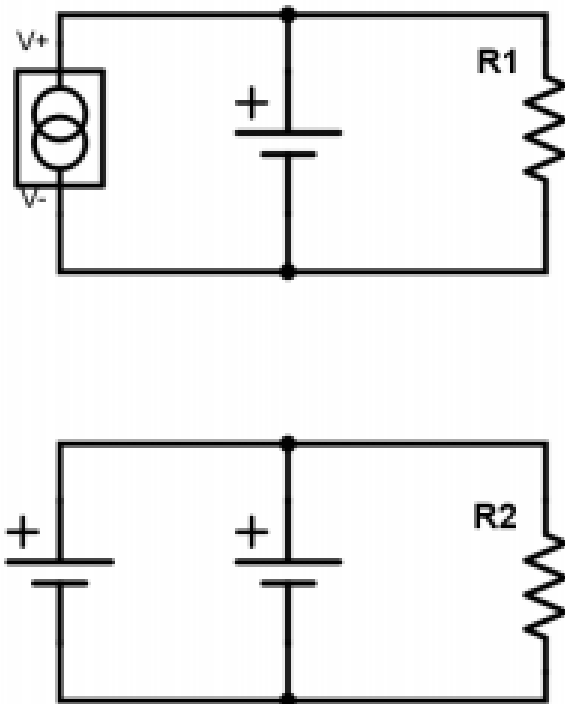


Fig. 3: Top: the proper way to think of charging your battery. Below: a risky way to do so.

VIII. CHARGING SUGGESTIONS AND TESTING REQUIREMENTS

If possible, we strongly suggest purchasing and incorporating a fully featured charging suite if your project requires batteries. Those must meet rigorous safety standards in order to be sold in the USA. If this is not possible for any reason (your project is cost sensitive because it is for the developing world, you are using solar panels to charge a battery, etc.), we strongly suggest using an integrated circuit solution. As a last resort, you may attempt to design your own charging circuit. Regardless of the route you choose to take, due to the inherent danger of charging these batteries, everything must be approved by your TA and one of the power-centric TAs before you even bring your design to the breadboard. Once your charging design has been approved, its functionality must be validated to your TA in a demonstration before the battery is connected to the system. Initial testing of the charging circuit with the battery connected should be done in the senior design lab with a TA present and proper protective and emergency equipment easily accessible.

TABLE I: A Short Table of Suggested Charging ICs. (Google is Your Friend)

Chemistry	Suggestions
1S-2S Lithium	MAX1551/5, LM317 (see datasheet)
3S+ Lithium	LT1505, LT1512, LM317 (see datasheet)
Lead Acid	LM317 (see datasheet), LTC4020, LT3652

IX. ECE 445 PROCEDURES

- 1) Justify to the course staff that your project requires a battery.
- 2) Determine the appropriate chemistry for your project. Spill-resistant lead acid is vastly preferred.
- 3) Obtain safety documents:
 - a) If you are using a lead-acid battery: obtain the MSDS and battery data sheet.
 - b) If you are using a lithium battery: obtain additional fire safety and fire extinguisher training
- 4) In this order:
 - a) If your project allows for it: search for a commercially available charger.
 - b) Search for ICs that will perform the entire charge algorithm for you.
 - c) AS A LAST RESORT: Design your own charging circuit.
- 5) Simulate your circuit in SPICE, even if you plan to use a charging IC.
- 6) Have your TA and a power-centric TA review and approve your design.
- 7) Build your design on a breadboard and validate functionality to your TA before attaching a battery.
- 8) If using a lithium battery, place it in one of the lithium battery bags and an ammunition box whenever charging or discharging the battery.
- 9) To be done only in the senior design lab with a TA present and with protective and emergency equipment easily accessible: connect a battery to your circuit.
- 10) If your circuit behaves correctly, congratulations! You are done. If not, close is NOT close enough and you will have to return to Step 4.

If a problem occurs in your circuit:

- 1) Shut off power
- 2) Locate problem before power is restored
- 3) If circuit breaker is tripped, report to ece-eshop-repairs@illinois.edu to reset
- 4) If help is needed, contact Casey Smith ((217)-300-3722; cjsmith0@illinois.edu) or the electronics shop for assistance
- 5) If the situation is an emergency, call 911

A. Emergency Procedures

- If a lead acid battery spills: use the Battery Acid Spill Kit located in the back of the lab to clean the spill. Contact Casey Smith and your TA immediately.
- If a lithium battery explodes, call 911 and evacuate the area.
- If a lithium battery ignites, call 911 and extinguish it with either of the fire extinguishers located in the lab. They are both rated to extinguish electrical fires and should be at your bench whenever you are actively working with your batteries. Contact Casey Smith and your TA immediately.
- If a lithium battery swells, feels hot to the touch, or makes funny noises but does not ignite, keep the battery in the bag and ammunition box and contact Casey Smith and your TA immediately. The battery cannot be left unattended until it has been properly disposed of.

By signing below, you acknowledge that you have read this document and agree to follow the ECE 445 Course Staff's guidance regarding high capacity batteries and will complete all necessary safety training and adhere to the guidelines set forth in this document as well as additional guidelines as the course staff deems necessary.

Print Name

Date

Signature

Date

TABLE II: History of Revision

Revision	Date	Authors	Log
A	3/19/2016	Lenz	Creation
B	3/28/2016	O'Kane	Additional Information, General Revision
C	3/29/2016	SP16 Staff	Collaborative Revisions
D	4/7/2016	Salz	General Revision

ANEXO G: DATASHEET DEL TRANSFORMADOR



POWER TRANSFORMER
Chassis Mount: Single Secondary

F-401U

Electrical Specifications (@25C)

1. Maximum Power: 240.0 VA
2. Primary: 115V 50/60 Hz
3. Secondary: 24.0VCT @ 10.0 Amps
4. Voltage Regulation: 10 % TYP @ full load to no load
5. Temperature Rise: 35C TYP (45C MAX allowed)

Description:

The F-401U is part of a series which has a long history of reliable service in the field, made from a proven design and constructed with UL recognized materials.

Construction:

Wound on a single channel nylon bobbin. Materials are UL recognized, Class B (130° C) rated.

Safety:

These products are 100% hipot tested with an insulation of 1500V between primary and secondary windings as well as between the primary / secondary windings and the core.

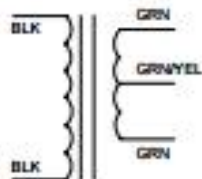
Dimensions: Units: In inches

A	B	C	D	E
4.125	3.437	3.750	2.750	3.00

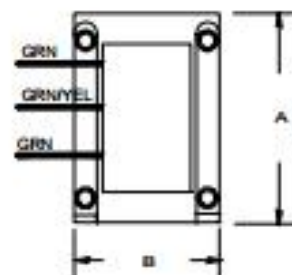
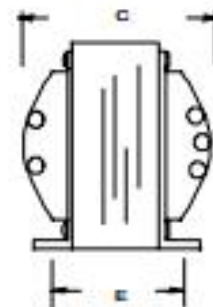
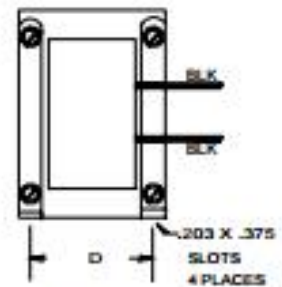
Lead length: 7.0 inches ± 1 inch

Weight: 8.0 lbs

Schematic:



Primary: Black to Black
 Secondary: Green to Green

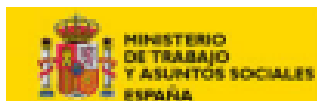


RoHS Compliance: As of manufacturing date February 2005, all standard products meet the requirements of 2011/65/EU, known as the RoHS initiative.

* Upon printing, this document is considered "uncontrolled". Please contact Triad Magnetics' website for the most current version.

ANEXO H: RIESGO ELÉCTRICO

Año: 1997



NTP 400: Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano

Courant électrique: effets de son passage par le corps humain
Electrical current: Effects passing through the human body

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Luis Pizar Gábarra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

Objetivo

El enorme desarrollo de la electricidad en el campo de la utilización ha ido acompañado de una preocupación preventivista, que ha generado la evolución de nuestros conocimientos acerca del comportamiento del cuerpo humano al someterse al paso de la electricidad.

Nos limitamos en esta NTP al accidente eléctrico ocasionado por el paso de la electricidad a través de nuestro organismo, tratando de dar el más reciente enfoque causa-efecto.

Antecedentes

Durante las últimas décadas se han realizado experiencias sobre cadáveres, personas vivas y fundamentalmente sobre animales, que permiten hacernos una idea de los efectos que produce el paso de la electricidad por el cuerpo de personas en condiciones fisiológicas normales.

Este desarrollo del conocimiento ha originado que la primera edición de la norma CEI 479, aparecida en el año 1974, fuese sustituida a los 10 años por la CEI 479-1:1984 y ésta, una década después es revisada por la CEI 479-1:1994, que aparece con carácter prospectivo y de aplicación provisional. Paralelamente, las Normas UNE 20-572-80 y 20-572-92 (parte 1) han ido adaptándose a esta evolución.

En esta NTP nos vamos a referir a la publicación más reciente, la norma CEI 479-1:1994 tratando con especial interés la fibrilación ventricular, que constituye la causa esencial de los accidentes mortales debidos a la electricidad.

Efectos de la corriente

Las consecuencias del paso de la corriente por el cuerpo pueden ocasionar desde lesiones físicas secundarias (golpes, caídas, etc.), hasta la muerte por fibrilación ventricular.

Una persona se electriza cuando la corriente eléctrica circula por su cuerpo, es decir, cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo, al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. La electrocución se produce cuando dicha persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo.

La fibrilación ventricular consiste en el movimiento anárquico del corazón, el cual, deja de enviar sangre a los distintos órganos y, aunque está en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento.

Por tetanización entendemos el movimiento incontrolado de los músculos como consecuencia del paso de la energía eléctrica. Dependiendo del recorrido de la corriente perderemos el control de las manos, brazos, músculos pectorales, etc.

La asfixia se produce cuando el paso de la corriente afecta al centro nervioso que regula la función respiratoria, ocasionando el paro respiratorio.

Otros factores fisiopatológicos tales como contracciones musculares, aumento de la presión sanguínea, dificultades de respiración, parada temporal del corazón, etc. pueden producirse sin fibrilación ventricular. Tales efectos no son mortales, son, normalmente,

reversibles y, a menudo, producen marcas por el paso de la corriente. Las quemaduras profundas pueden llegar a ser mortales.

Para las quemaduras se han establecido unas curvas (figura 1) que indican las alteraciones de la piel humana en función de la densidad de corriente que circula por un área determinada (mA/cm^2) y el tiempo de exposición a esa corriente. Se distinguen las siguientes zonas:

- Zona 0: habitualmente no hay alteración de la piel, salvo que el tiempo de exposición sea de varios segundos, en cuyo caso, la piel en contacto con el electrodo puede tomar un color grisáceo con superficie rugosa.
- Zona 1: se produce un enrojecimiento de la piel con una hinchazón en los bordes donde estaba situado el electrodo.
- Zona 2: se provoca una coloración parda de la piel que estaba situada bajo el electrodo. Si la duración es de varias decenas de segundos se produce una clara hinchazón alrededor del electrodo.
- Zona 3: se puede provocar una carbonización de la piel.

Es importante resaltar que con una intensidad elevada y cuando las superficies de contacto son importantes se puede llegar a la fibrilación ventricular sin ninguna alteración de la piel.

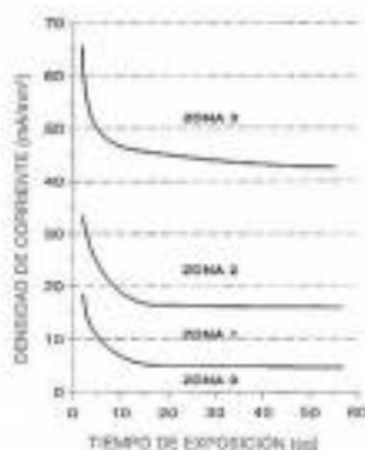


Fig. 1: Efecto sobre la piel

En la figura 2 se indican los efectos que produce una corriente alterna de frecuencia comprendida entre 15 y 100 Hz con un recorrido mano izquierda-los dos pies. Se distinguen las siguientes zonas:

- Zona 1: habitualmente ninguna reacción.
- Zona 2: habitualmente ningún efecto fisiológico peligroso.
- Zona 3: habitualmente ningún daño orgánico. Con duración superior a 2 segundos se pueden producir contracciones musculares dificultando la respiración, paradas temporales del corazón sin llegar a la fibrilación ventricular, ...
- Zona 4: riesgo de parada cardíaca por: fibrilación ventricular, parada respiratoria, quemaduras graves, ...

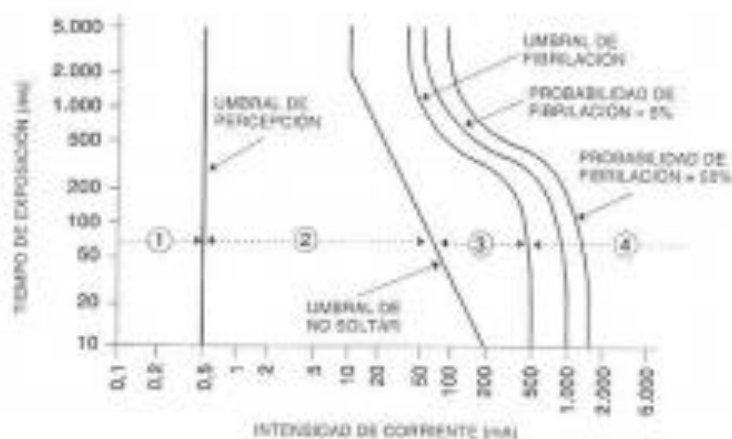


Fig. 2: Corriente alterna, efecto en el organismo

Principales factores que influyen en el efecto eléctrico

Intensidad de la corriente

Es uno de los factores que más inciden en los efectos y lesiones ocasionados por el accidente eléctrico. En relación con la intensidad de corriente, son relevantes los conceptos que se indican a continuación.

Umbral de percepción: es el valor mínimo de la corriente que provoca una sensación en una persona, a través de la que pasa esta corriente. En corriente alterna esta sensación de paso de la corriente se percibe durante todo el tiempo de paso de la misma; sin embargo, con corriente continua solo se percibe cuando varía la intensidad, por ello son fundamentales el inicio y la interrupción del paso de la corriente, ya que entre dichos instantes no se percibe el paso de la corriente, salvo por los efectos térmicos de la misma. Generalizando, la Norma CEE 473-11594 considera un valor de 0,5 mA en corriente alterna y 2 mA en corriente continua, cualquiera que sea el tiempo de exposición.

Umbral de reacción: es el valor mínimo de la corriente que provoca una contracción muscular.

Umbral de no soltar: cuando una persona tiene sujetos unos electrodos, es el valor máximo de la corriente que permite a esa persona soltarlos. En corriente alterna se considera un valor máximo de 10 mA, cualquiera que sea el tiempo de exposición. En corriente continua, es difícil establecer el umbral de no soltar ya que solo el comienzo y la interrupción del paso de la corriente provoca el dolor y las contracciones musculares.

Umbral de fibrilación ventricular: es el valor mínimo de la corriente que puede provocar la fibrilación ventricular. En corriente alterna, el umbral de fibrilación ventricular decrece considerablemente si la duración del paso de la corriente se prolonga más allá de un ciclo cardíaco. Adecuando los resultados de las experiencias efectuadas sobre animales a los seres humanos, se han establecido unas curvas, por debajo de las cuales no es susceptible de producirse. La fibrilación ventricular está considerada como la causa principal de muerte por choque eléctrico.

En corriente continua, si el polo negativo está en los pies (corriente descendente), el umbral de fibrilación es de aproximadamente el doble de lo que sería si el polo positivo estuviese en los pies (corriente ascendente). Si en lugar de las corrientes longitudinales antes descritas fuese una corriente transversal, la experiencia sobre animales hace suponer que, solo se producirá la fibrilación ventricular con intensidades considerablemente más elevadas.

En la figura 3 se representan los efectos de una corriente continua ascendente con trayecto mano izquierda-los dos pies; se puede apreciar que para una duración de choque superior a un ciclo cardíaco el umbral de fibrilación en corriente continua es muy superior que en corriente alterna.



Fig. 3: Corriente continua, efecto en el organismo

Periodo vulnerable: afecta a una parte relativamente pequeña del ciclo cardíaco durante el cual las fibras del corazón están en un estado no homogéneo de excitabilidad y la fibrilación ventricular se produce si ellas son excitadas por una corriente eléctrica de intensidad suficiente. Corresponde a la primera parte de la onda T en el electrocardiograma y supone aproximadamente un 10% del ciclo cardíaco completo. Ver figura 4.

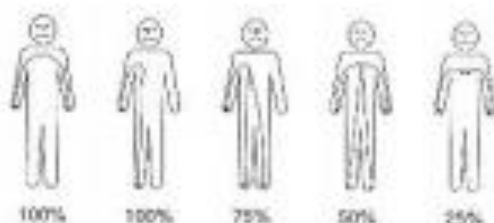


Fig. 6: Impedancia interna del organismo

En las tablas 1 y 2 se indican unos valores de la impedancia total del cuerpo humano en función de la tensión de contacto, tanto para corriente alterna y continua, respectivamente.

Tabla 1: Impedancia del cuerpo humano frente a la corriente alterna

Tensión de contacto (V)	Trayectoria mano-mano, piel seca, c. alterna, frecuencia 50-60 Hz, superficie de contacto 50-100 cm ²		
	Impedancia total (Ω) del cuerpo humano que no son sobrepasados por el		
	5% de las personas	50% de las personas	95% de las personas
25	1.750	3.250	6.100
50	1.450	2.625	4.375
75	1.250	2.200	3.500
100	1.200	1.875	3.200
125	1.125	1.625	2.875
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500
valor asintótico	650	750	650

Tabla 2: Impedancia de cuerpo humano frente a la corriente continua

Tensión de contacto (V)	Trayectoria mano-mano, piel seca, c. continua, superficie de contacto 50-100 cm ²		
	Impedancia total (Ω) del cuerpo humano que no son sobrepasados por el		
	5% de las personas	50% de las personas	95% de las personas
25	2.200	3.875	8.600
50	1.750	2.990	5.300
75	1.510	2.470	4.000
100	1.340	2.070	3.400
125	1.230	1.750	3.000
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500
valor asintótico	650	750	650

Las variaciones de la impedancia del cuerpo humano en función de la superficie de contacto, se representan en la figura 7, en relación con la tensión aplicada. En la Instrucción ME BT 001 artículo 58 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) se considera que la resistencia del cuerpo entre mano y pie es de 2.500 ohm.

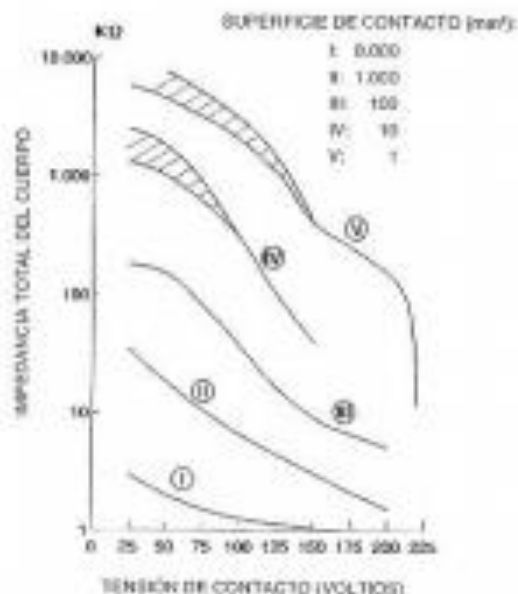


Fig. 7: Impedancia del cuerpo en función de la superficie de contacto (50 Hz)

Tensión aplicada

En sí misma no es peligrosa pero, si la resistencia es baja, ocasiona el paso una intensidad elevada y, por tanto, muy peligrosa. El valor límite de la tensión de seguridad debe ser tal que aplicada al cuerpo humano, proporcione un valor de intensidad que no suponga riesgos para el individuo.

Como anteriormente se mencionó, la relación entre la intensidad y la tensión no es lineal debido al hecho de que la impedancia del cuerpo humano varía con la tensión de contacto. Ahora bien, por depender la resistencia del cuerpo humano, no solo de la tensión, sino también de la trayectoria y del grado de humedad de la piel, no tiene sentido establecer una única tensión de seguridad sino que tenemos que referirnos a infinitas tensiones de seguridad, cada una de las cuales se correspondería a una función de las distintas variables anteriormente mencionadas.

Las tensiones de seguridad aceptadas por el REIST MBT-210.2 son 24 V para emplazamientos húmedos y 50 V para emplazamientos secos, siendo aplicables tanto para corriente continua como para corriente alterna de 50 Hz.

Frecuencia de la corriente alterna

Normalmente, para uso doméstico e industrial se utilizan frecuencias de 50 Hz (en U.S.A. de 60 Hz), pero cada vez es más frecuente utilizar frecuencias superiores, por ejemplo:

- 400 Hz en aeronáutica.
- 450 Hz en soldadura.
- 4.000 Hz en electroterapia.
- Hasta 1 MHz en alimentadores de potencia.

Experimentalmente se han realizado medidas de las variaciones de impedancia total del cuerpo humano con tensiones comprendidas entre 10 y 25 Voltios en corriente alterna, y variaciones de frecuencias entre 25 Hz y 20 KHz.

A partir de estos resultados se han deducido las curvas representadas en la figura 8, para tensiones de contacto comprendidas entre 10 y 1.000 Voltios y para un trayecto mano-mano o mano-pie.