



GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO EN EL GIMNASIO DE LA UNIVERSIDAD, MEDIANTE BICICLETAS ESTÁTICAS

Autor: Juan Sáez Jaén

Director: Fidel Fernández Bernal

Co-Director: Luis Manuel Mochón Castro

JUNIO 2024

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO EN EL GIMNASIO DE LA UNIVERSIDAD, MEDIANTE
BICICLETAS ESTÁTICAS

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 23-24 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.: Juan Sáez Jaén

Fecha: 26/ 06 / 2024



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Fidel Fernández Bernal

**FERNANDEZ
BERNAL
FIDEL -
33501930S**

Firmado digitalmente por
FERNANDEZ BERNAL FIDEL -
33501930S
Nombre de reconocimiento (DN):
c=ES,
serialNumber=IDCES-33501930S,
givenName=FIDEL,
sn=FERNANDEZ BERNAL,
cn=FERNANDEZ BERNAL FIDEL -
33501930S
Fecha: 2024.06.26 19:17:47 +02'00'

Fdo.: Luis Manuel Mochón Castro

**MOCHON
CASTRO LUIS
MANUEL -
29080555E**

Firmado digitalmente por MOCHON
CASTRO LUIS MANUEL - 29080555E
Nombre de reconocimiento (DN):
c=ES,
serialNumber=IDCES-29080555E,
givenName=LUIS MANUEL,
sn=MOCHON CASTRO,
cn=MOCHON CASTRO LUIS MANUEL
- 29080555E
Fecha: 2024.06.26 18:38:08 +02'00'



GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO EN EL GIMNASIO
DE LA UNIVERSIDAD, MEDIANTE BICICLETAS
ESTÁTICAS

Autor: Juan Sáez Jaén

Director: Fidel Fernández Bernal

Co-Director: Luis Manuel Mochón Castro

JUNIO 2024

Madrid

ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO EN EL GIMNASIO DE LA UNIVERSIDAD, MEDIANTE BICICLETAS ESTÁTICAS

Autor: Sáez Jaén, Juan.

Director: Fernández Bernal, Fidel.

Co-Director: Mochón Castro, Luis Manuel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

Resumen del proyecto:

Este proyecto tiene la finalidad de modificar el gimnasio de la universidad de forma que sea más sostenible. Para ello se estudiará la posible modificación de las bicicletas estáticas para que generen electricidad con su uso.

1. Introducción

La idea de este proyecto surge con la necesidad de nuevas tecnologías de generación eléctrica limpia. Se pretende emplear una energía ya existente con el fin de convertirla en electricidad. Es decir, aprovechar el esfuerzo de un deportista del gimnasio para este fin, concretamente en una bicicleta estática. De esta manera se seguirán las bases del plan REPower [1] de la UE.

2. Definición del proyecto y descripción del sistema

La solución que estudiar consiste en diseñar un circuito eléctrico capaz de conseguir este efecto de forma eficiente, así como los cambios mecánicos necesarios para su correcto funcionamiento.

Se decide emplear un motor típico de bicicleta eléctrica e invertir el circuito para que actúe como generador. Dado que se trata de un Brushless-DC, será necesario convertir la tensión obtenida en una apta para la carga de una batería donde se almacenará la energía. Para convertir dicha tensión, se diseña un circuito (Ilustración 1) que consta de un puente rectificador trifásico a la salida del generador, seguido de 2 circuitos en paralelo (los cuales contarán con un convertidor reductor para el control del sistema).

El primer circuito será el encargado de cargar la batería (controlando que no supere su corriente máxima admisible, ni siga cargando una vez esté en su máxima capacidad).

En paralelo se tiene un circuito prácticamente idéntico al de la batería, pero en el lugar habrá una resistencia de frenado encargada de disipar la potencia que no sea capaz de absorber la batería.

Para el diseño del control se emplearán 2 controles PI idénticos que activarán mediante un factor de servicio ambos convertidores [2].

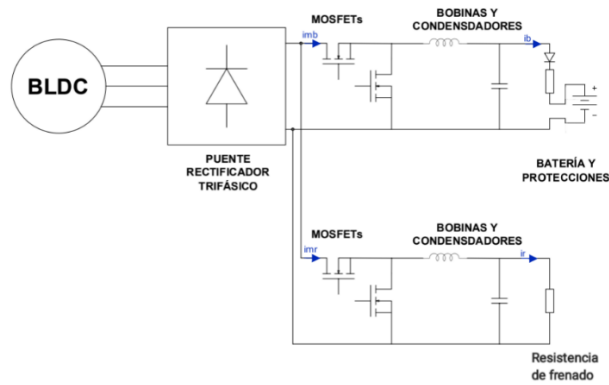


Ilustración 1: Boceto del circuito eléctrico

3. Resultados

En las simulaciones realizadas se ve que el diseño eléctrico es válido para el objetivo del proyecto. Se observa que la corriente por cada circuito es la deseada. Sin embargo, la batería tiene una capacidad de absorber como máximo 168W. Esta potencia corresponde a un pedaleo medio, por lo que con un entrenamiento intenso se estaría disipando mucha potencia por la resistencia, haciendo el diseño menos eficiente.

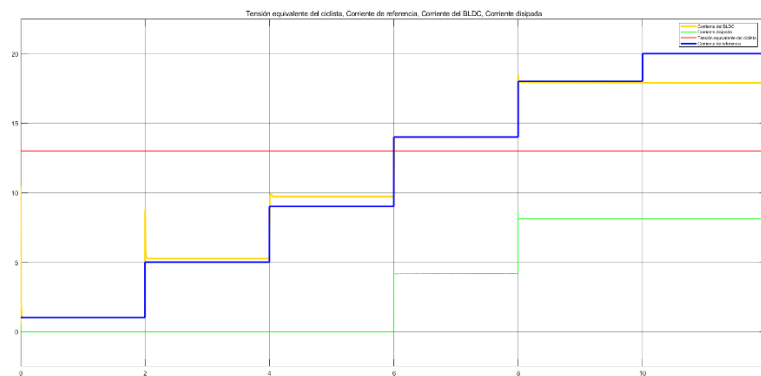


Ilustración 2: Seguimiento de corriente de referencia

En la Ilustración 2 se observa en azul la corriente que debe circular por el generador como referencia. En amarillo se observa la corriente que circula realmente y en verde la corriente disipada.

4. Conclusión

Vistos los resultados se da por válido el diseño, a pesar de no ser económicamente rentable, es una motivación hacia un futuro más sostenible. Además, el tener un punto de acceso de carga para dispositivos en la misma maquina en la que se realiza el ejercicio es una atracción más para el ciclista.

5. Bibliografía

- [1] Europea, U. (Último acceso: 24 de 06 de 2024). *comission europa*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_es
- [2] D. W. Hart, *Power Electronics*, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 2010.

ELECTRIC GENERATION FROM STATIONARY BIKES IN THE UNIVERSITY GYM

Author: Sáez Jaén, Juan.

Director: Fernández Bernal, Fidel.

Co-Director: Mochón Castro, Luis Manuel.

Collaborative entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

Project Summary:

The goal of this project is to enhance the sustainability of the university gym. To achieve this, we will investigate the potential modification of stationary bicycles to enable electricity generation through their use.

1. Introduction

The idea for this project arises from the need for new clean electricity generation technologies. The goal is to harness an existing form of energy and convert it into electricity. Specifically, this involves utilizing the effort exerted by a gym athlete on a stationary bicycle. This approach aligns with the principles of the sustainability plan REPower of the EU [1].

2. Project definition and system description

The solution under study involves designing an electrical circuit capable of achieving this effect efficiently, along with the necessary mechanical modifications for proper functioning.

A typical electric bicycle motor is chosen, and the circuit is modified to make the motor act as a generator. Since it is a Brushless-DC motor, it will be necessary to convert the generated voltage into a suitable form for charging a battery where the energy will be stored. To convert this voltage, a circuit is designed (Illustration 1) consisting of a three-phase rectifier bridge at the generator's output, followed by two parallel circuits (each containing a buck converter for system control).

The first circuit is responsible for charging the battery (ensuring it does not exceed its maximum allowable current, nor continue charging once it reaches full capacity).

In parallel, there is a nearly identical circuit, but instead of the battery, there is a braking resistor tasked with dissipating the power that the battery cannot absorb.

For control design, two identical PI controllers will be used, which will activate both converters using a duty cycle factor [2].

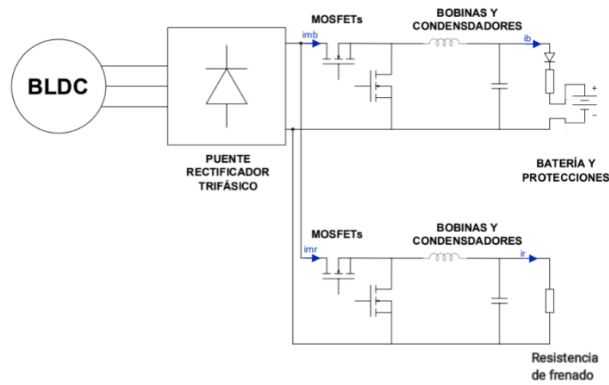


Illustration 1: Sketch of the Electrical Circuit

3. Results

In the simulations conducted, it is shown that the electrical design is valid for the project's objective. The current in each circuit meets the desired specifications. However, the battery can absorb a maximum of 168W, which corresponds to a moderate pedalling effort. During intense training sessions, a significant amount of power would be dissipated by the resistor, making the design less efficient.

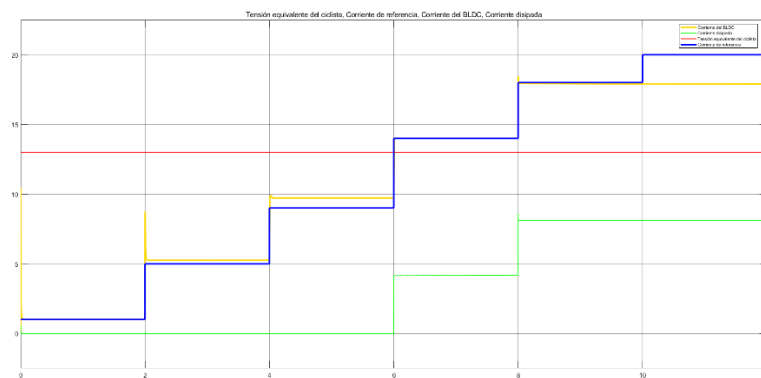


Illustration 2: Reference current tracking

In Illustration 2, the blue line represents the reference current that should flow through the generator. The yellow line shows the actual current flowing through the generator, and the green line indicates the dissipated current.

4. Conclusion

Based on the results, the design is considered valid. Despite not being economically profitable, it serves as motivation towards a more sustainable future. Additionally, having a charging point for devices on the same machine where the exercise is performed adds further appeal for the cyclist.

5. Bibliography

- [1] Europea, U. (Accessed: 24 de 06 de 2024). *comission europa*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_es
- [2] D. W. Hart, *Power Electronics*, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 2010.

Índice

1.	Introducción	11
1.1.	Actualidad	11
1.2.	Idea de proyecto	12
1.3.	Cronología.....	13
2.	Diseño.....	14
2.1.	Estructura de la bicicleta estática	14
2.2.	Diseño y componentes	15
2.2.1	Generador Brushless-DC	16
2.2.2	Puente rectificador trifásico	16
2.2.3	Convertidor reductor.....	19
2.2.4	Batería	20
3.	Funcionamiento y cálculos	22
3.1.	Generador.....	22
3.2.	Control y consumo.....	23
3.2.1	Control PI	25
3.2.2	Referencia del control PI	27
4.	Resultados y simulaciones.....	30
4.1.	Simulación del circuito generador	30
4.2.	Simulación del circuito de control y batería y límites de funcionamiento	31
5.	Diseño mecánico y montaje	35
5.1.	Plato-Piñón y cadena	35
5.2.	Engranaje planetario.....	36
5.3.	Arquitectura del prototipo.....	37
5.3.1	Resistencia de frenado	37
6.	Componentes y presupuesto	38
6.1.	Generador: Motor Transmotec -B86112-48.....	38
6.2.	Puente rectificador trifásico	38
6.3.	Condensador 680 μF (FPB).....	38
6.4.	Convertidor reductor DC-DC.....	39
6.4.1	MOSFET	39
6.4.2	Bobina 330 μH	39
6.4.3	Condensador 600 μF	40
6.5.	Batería.....	40

6.6.	Resistencia de frenado.....	40
6.7.	Microprocesador (Arduino)	40
6.8.	Pantalla	41
6.9.	Elementos mecánicos	41
6.10.	Presupuesto del prototipo.....	41
7.	Generación de energía	43
8.	Objetivos de desarrollo sostenible.....	45
9.	Conclusión	47
	Bibliografía	48
	Anexo A: Gráficas y tablas.....	49
	Anexo B: Datasheets	52
	Anexo C: Esquemas	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Cronograma del proyecto	13
Figura 2:	Modelo de la bicicleta estática a modificar.....	14
Figura 3:	Freno magnético de la bicicleta	14
Figura 4:	Boceto del circuito del proyecto	15
Figura 5:	Explicación motor/generador	16
Figura 6:	Puente rectificador trifásico (Simulink).....	17
Figura 7:	Convertidor reductor simulink	19
Figura 8:	Simulación del generador (Simulink)	22
Figura 9:	Simulación control del circuito de la batería.....	23
Figura 10:	Simulación control del circuito de la resistencia.....	24
Figura 11:	Simulación de las ecuaciones de control principal.....	28
Figura 12:	Simulación de las ecuaciones del control secundario	28
Figura 13:	Simulación generador con fuente de corriente	30
Figura 14:	Montaje plato-piñón y cadena	35
Figura 15:	Planetario (jeroitim.blogspot.com)	36
Figura 16:	Bicicleta estática para creación de prototipo.....	37
Figura 17:	Objetivos de desarrollo sostenible.....	45

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Procedencia del gas importado en UE [Europea]	11
Gráfica 2: Tensiones en la simulación del puente.....	18
Gráfica 3: Tensión sin filtrar a la salida del puente	18
Gráfica 4: Función de transferencia del lazo cerrado con distintas pulsaciones	26
Gráfica 5: Respuesta en frecuencia del lazo cerrado	27
Gráfica 6: Relación tensión-rpm del BLDC con corriente constante 10 A.....	30
Gráfica 7: Tensión después del puente rectificador (sin FPB).....	31
Gráfica 8: Tensión después del puente rectificador (con FPB)	31
Gráfica 9: Datos de entrada en simulación de control a referencia constante	32
Gráfica 10: Actuación del control PI, en las corrientes, ante cambios (rampas) en la tensión de entrada	33
Gráfica 11: Datos de la batería durante 30 segundos de funcionamiento	33
Gráfica 12: Límites de funcionamiento idóneo	34
Gráfica 13: Lazo cerrado con diferentes ω_n	49
Gráfica 14: Lazo cerrado con seta entre 0,5 y 1.....	49
Gráfica 15: Efecto de la ponderación b	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precios motor Transmotec en función de la cantidad pedida.....	38
Tabla 2: Precios de los diodos STPS10120C, en función de la cantidad pedida en Mouser	38
Tabla 3: Precios de un condensador de Vishay, en función de la cantidad pedida en RS	39
Tabla 4: Precios MOSFET IRLZ44NSTRLPBF, en función de la cantidad pedida en Mouser.....	39
Tabla 5: Precios bobina de KEMET, en función de la cantidad pedida en Mouser.....	39
Tabla 6: Precio de la resistencia de frenado por cantidad pedida en RS	40
Tabla 7: Componentes y precio esperado para la fabricación de un prototipo	41
Tabla 8: Datos simulación motor con resistencia de 3Ω	50
Tabla 9: Datos simulación motor con fuente de 10A.....	50
Tabla 10: Datos simulación motor con fuente de 7,5A.....	50
Tabla 11: Datos simulación motor con fuente de 5A.....	51

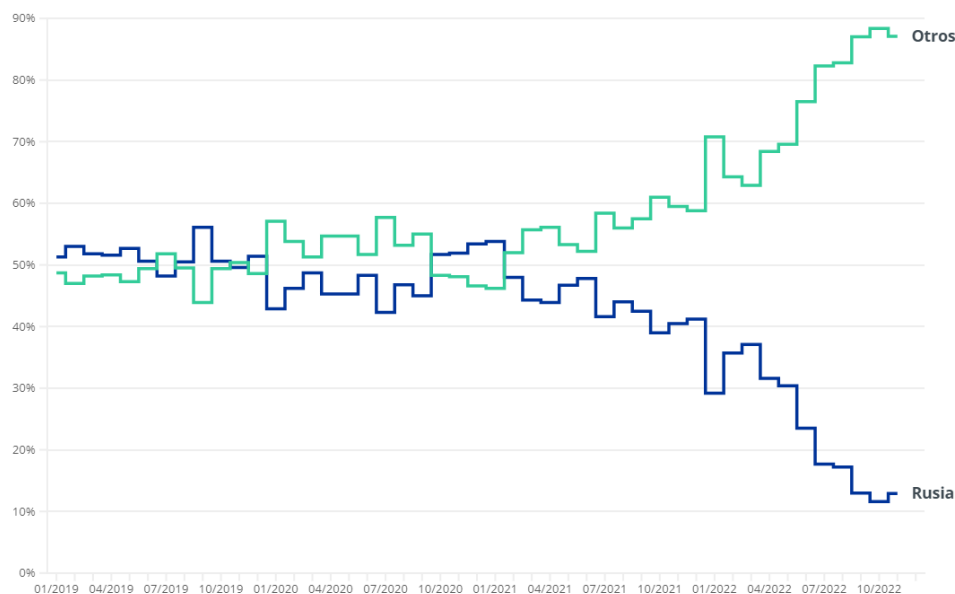
ÍNDICE DE DATASHEET

Datasheet 1: BLDC Transmotec 48V 436W	52
Datasheet 2: Diodo STPS10120C.....	53
Datasheet 3: Condensador Vishay 680 μF	54
Datasheet 4: MOSFET IRLZ44N p1	55
Datasheet 5: MOSFET IRLZ44N p2	56
Datasheet 6: Bobina Kemet.....	57
Datasheet 7: Batería 100Ah 1/3.....	58
Datasheet 8: Batería 100Ah 2/3.....	59
Datasheet 9: Batería 100Ah 3/3.....	60
Datasheet 10: Resistencia de potencia 1/2.....	61
Datasheet 11: Resistencia de potencia 2/2.....	62
Datasheet 12: Arduino	63
Datasheet 13: Arduino	64
Datasheet 14: Arduino	65
Datasheet 15: Arduino	66
Datasheet 16: Arduino	67
Datasheet 17: Arduino	68
Datasheet 18: Arduino	69
Datasheet 19: Arduino	70
Datasheet 20: Arduino	71
Datasheet 21: Pantalla LCD	72
Datasheet 22: Pantalla LCD	73
Datasheet 23: Pantalla LCD	74
Datasheet 24: Pantalla LCD	75
Datasheet 25: Pantalla LCD	76
Datasheet 26: Pantalla LCD	77
Datasheet 27: Pantalla LCD	78
Datasheet 28: Pantalla LCD	79

1. Introducción

1.1. Actualidad

Uno de los principales problemas que azota a Europa (raíz por el cual se da pie a este proyecto) es la crisis energética en la que nos encontramos. En 2021 la UE importó un 83% de su gas natural del cual aproximadamente la mitad provenía de Rusia como se ve en la Gráfica 1.



Gráfica 1: Procedencia del gas importado en UE [1]

En la misma gráfica (eje de abscisas indica fecha y eje ordenadas indica en porcentaje la procedencia del gas importado), se ve como a partir de 2021 la importación del gas procedente de Rusia comienza a descender notablemente. Dado a la alta dependencia que teníamos de dicha fuente de energía, Europa se vio sumida en una gran crisis energética que se quedó claramente reflejada en los precios.

Para combatir estos problemas se plantearon varias soluciones, como el Plan REPower [2] que plantea una serie de puntos para evitar usar combustibles fósiles a la vez que ayudar a la crisis climática actual:

- **Ahorro de energía:** Como es de esperar, esta es una de las medidas más eficaces para hacer frente a ambas crisis. Por ello Europa propone mejorar las medidas de eficiencia energética a largo plazo. Ahorrar energía especialmente cuando el clima lo permite para así poder hacer frente a las temporadas del año en las que hace más frío y es necesaria mayor energía para calentar los hogares.
- **Diversificación de las fuentes energéticas y apoyos internacionales:** Especialmente se intentará crear nuevas fuentes de hidrógeno verde, así como fuentes ecológicas que no afecten al cambio climático de forma tan negativa como hacen algunas de las que se usan actualmente.

- Aceleración de las fuentes renovables: Una expansión y aceleración de las energías renovables acelera nuestra independencia, así como impulsa nuestra transición ecológica y reduce gastos a largo plazo. Concretamente se propone aumentar el objetivo para 2030 en materia de energías renovables del 40% al 45%.
- Reducción de combustibles fósiles: Como ya se ha mencionado previamente, el cambio climático es también un problema al que se pretende hacer frente con este plan y por ello la sustitución del petróleo y el gas natural reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2. Idea de proyecto

Siendo la crisis energética y climática un tema tan presente en la actualidad, se buscó la manera de, en mayor o menor medida, contribuir aportando una nueva fuente energética desde la universidad. Por ello surgió la idea de aprovechar la energía desarrollada en el pedaleo de un ciclista que se encuentra haciendo deporte en el gimnasio de la universidad, modificando varias bicicletas estáticas de las que dispone el gimnasio para aprovechar la energía cinética. Dicha energía eléctrica se podría almacenar en baterías para que los usuarios puedan cargar sus dispositivos electrónicos (se podría plantear la posibilidad de conectar el circuito a la red de la universidad, pero la electricidad que se puede llegar a generar no sería de gran aportación a la red y, por ello, se ve más útil la carga de baterías para usuarios del gimnasio).

Con esto conseguimos una serie de objetivos:

- Creación de una nueva fuente de energía en la universidad.
- Reducción del gasto en la red eléctrica.
- Promover el ejercicio.
- Estudiar la viabilidad de usar el ejercicio humano como fuente de energía.
- Aportar una diferenciación al gimnasio respecto al resto de gimnasios en el tema ecológico.

De esta manera, la intención principal de este proyecto es estudiar la viabilidad de esta idea. Lo cual conlleva:

- Diseño de la modificación de las bicicletas estáticas.
- Estudio del mercado para saber el coste aproximado de las modificaciones e implantación.
- Realización de una simulación mediante Simulink (Matlab).
- Estudio de los resultados generados por la simulación para considerar su rentabilidad.

1.3. Cronología

En la Figura 1 se ve el tiempo que se plantea emplear para cada parte del proyecto, siendo la creación del diseño, así como la simulación las partes a las que más se le dedicará tiempo ya que en ello reside la importancia y el correcto funcionamiento del proyecto.

	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Diseño							
Simulación							
Presupuesto							
Estudio de datos							
Estudio de mercado							
Aplicación al gimnasio							
Redacción							

Figura 1: Cronograma del proyecto

2. Diseño

2.1. Estructura de la bicicleta estática



Figura 2: Modelo de la bicicleta estática a modificar



Figura 3: Freno magnético de la bicicleta

El funcionamiento de una bicicleta estática (Figura 2) es sencillo, el movimiento del deportista se transfiere al disco cinético a través de la cadena que podemos ver en la Figura 3. Por otro lado, aunque no sean visibles en dichas ilustraciones, el ciclista dispone de unos botones con los que puede modificar la distancia del imán (recuadro rojo) al disco (el mecanismo que modifica la distancia no es estudio de este proyecto). De esta forma, cuanto más cerca se encuentre del disco, más resistencia pondrá ante el movimiento requiriendo más esfuerzo al ciclista. Este mecanismo será sustituido por el generador solicitando más o menos corriente.

Para la obtención de electricidad se pueden plantear diversos diseños. Uno ya usado por muchos y que se encuentra fácilmente en internet es conectar una dinamo. Dicho aparato sirve para convertir energía mecánica en energía eléctrica. Esto es de gran utilidad ya que la electricidad generada es directamente una tensión continua que es la que se emplea para cargar baterías de dispositivos móviles y similares. Sin embargo, este sistema tiene una serie de inconvenientes como pueden ser:

- Produce ruido que puede ser incómodo para los deportistas del gimnasio.
- Una eficiencia reducida frente a otros generadores como el que se estudiará más adelante.
- No permite obtener, directamente, la tensión adecuada para la carga de una batería.

Por este motivo, se ha decidido buscar una alternativa que evite estos inconvenientes y mantenga la estética de la bicicleta. Se ha tomado la decisión de usar un motor de bicicleta eléctrica. De esta manera, se usaría la rueda colocándola en el lugar del disco y eliminando el freno magnético y el mecanismo que lo formaba, manteniendo así la estética de una bicicleta convencional.

2.2. Diseño y componentes

Para el correcto funcionamiento de un supuesto prototipo se necesitan los siguientes componentes:

- Generador (motor Brushless-DC).
- Puente rectificador trifásico.
- Componentes electrónicos para el control del sistema (bobinas, condensadores, y MOSFETs).
- Microprocesador (Placa compatible con Arduino).
- Pantalla táctil o botonera.
- Cables.
- Batería.
- Resistencia de frenado (necesaria para disipar la energía que no pueda absorber la batería).

Con ellos se podrá montar el circuito de la Figura 4:

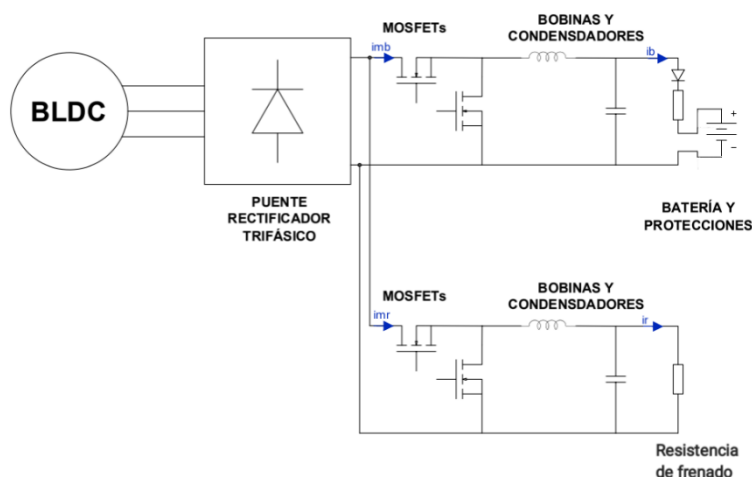


Figura 4: Boceto del circuito del proyecto

A lo largo del proyecto se hará referencia a las corrientes mostradas en la Figura 4. Las corrientes que salen del puente rectificador, " i_{mb} " e " i_{mr} ", son las que van desde el motor al circuito de la batería y al circuito de la resistencia de frenado respectivamente. Mientras que " i_b " es la corriente que circula directamente por la batería e " i_r " la que circula por la resistencia de frenado. Cabe destacar que la suma de " i_{mb} " e " i_{mr} " es la corriente que obtenemos directamente del generador (por tanto, la que va relacionada con el par que ejerce el ciclista).

2.2.1 Generador Brushless-DC

A pesar de tratarse de un motor eléctrico y estar diseñado para mover la rueda, se puede invertir el circuito, como cualquier motor, haciendo que funcione como un generador (Figura 5).

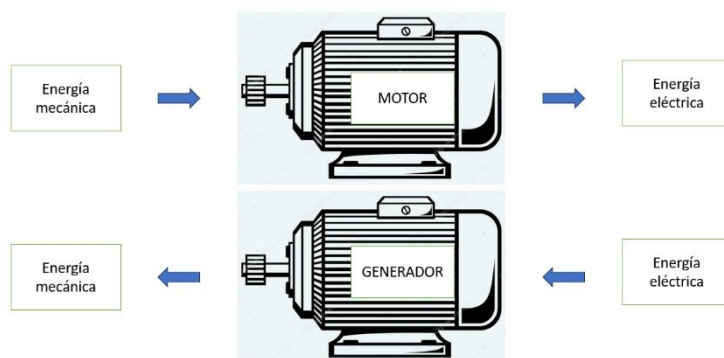


Figura 5: Explicación motor/generador

Los motores que encontramos en las bicicletas eléctricas y que emplearemos en nuestro diseño son motores Brushless DC (motor sin escobillas) o por su abreviatura **BLDC**. Estos motores presentan varias ventajas respecto a otros motores como puede ser un motor de corriente continua. Al no tener escobillas, no existe rozamiento, lo cual se traduce en menos pérdidas mecánicas, así como menor desgaste. Además, se consigue un generador que desprende menos calor y ruido por la misma ausencia de rozamiento.

El generador está compuesto por 3 bobinas, conectadas en estrella sin neutro y genera una tensión muy similar a una trifásica senoidal, al girar dichas bobinas en el rotor (compuesto por un imán). Sin embargo, si se pudiese testear con un prototipo se vería que no llega a ser senoidal perfecta y tiene componentes de una trapezoidal. Para el objetivo de cargar una batería, este efecto es de gran ayuda ya que, al ser trapezoidal, la rectificación que se explicará más adelante es mejor.

2.2.2 Puente rectificador trifásico

Como se ha mencionado, el generador compuesto por un BLDC genera una tensión alterna trifásica, mientras que para cargar una batería se necesita una sola onda continua. Por ello, se hará uso de un puente rectificador trifásico.

Dicho puente está formado por 6 diodos. Existe la opción de usar tiristores en su lugar y así poder realizar el control desde ellos. Sin embargo, se ha decidido usar diodos, lo cual simplifica esta parte del circuito cumpliendo los requisitos que se buscan. Posteriormente se explicará cómo se realiza el control que necesitamos mediante un convertidor reductor (Buck converter).

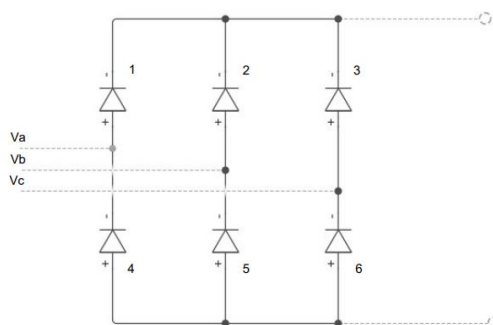
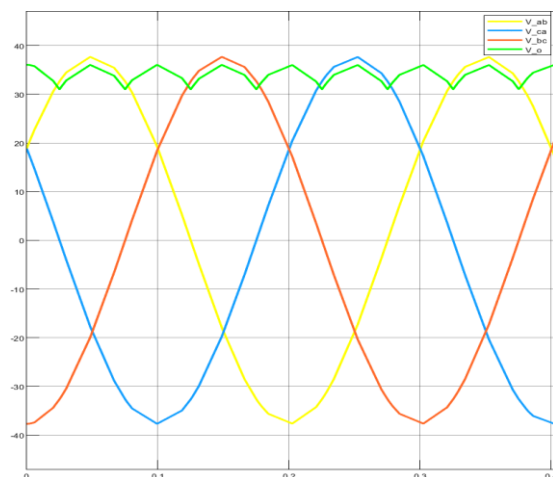


Figura 6: Puente rectificador trifásico (Simulink)

En la Figura 6 se puede ver el esquema del puente ya mencionado, dibujado en un simulador. En dicha imagen se muestran los 6 diodos y varias líneas dibujadas en discontinuo, las 3 situadas a la izquierda simulan la conexión con el BLDC (una línea por fase) mientras que en la derecha se conectaría el resto del circuito ya con corriente monofásica (haría falta un filtro paso bajo para obtener corriente continua). Para situar la tensión de entrada, se coloca el origen de fase en V_a , V_b estará atrasada 120° y V_c adelantada 120° .

Para entender el funcionamiento del puente se debe saber que la corriente en los diodos solo puede circular en un sentido siendo este de mayor a menor tensión. Por ello, solo estarán activos a la vez 2 diodos, uno de los situados en la parte superior (diodos 1, 2 y 3) y uno de la línea inferior (diodos 4, 5 y 6) haciendo que la tensión que vemos entre los 2 puntos del circuito de continua sea la mayor de las tensiones compuestas de ese instante (al tener 3 fases, tenemos un total de 6 combinaciones de tensión). Este efecto se ve en la Gráfica 2. En dicha gráfica solo se han dibujado 3 de las tensiones mencionadas, faltan sus inversas por lo que cada ciclo de la onda de salida (color verde) coincide con una de las tensiones compuestas de entrada.

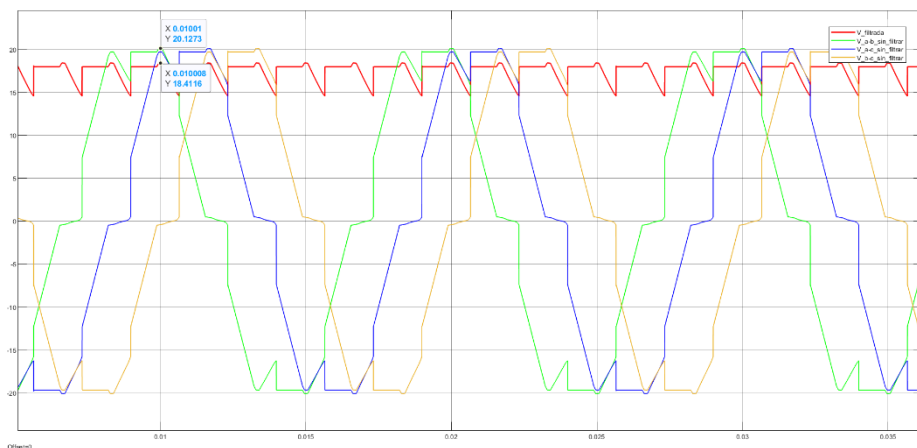
También se puede ver una pequeña caída de tensión a la salida. Esto se debe a que cada diodo tiene una caída de tensión que nos debe facilitar el fabricante. Dicha caída no suele superar los 2V por diodo (para semejante caída se requiere mucha corriente, por lo que se debe esperar una caída de tensión menor). Concretamente para esta simulación (cuyos valores están puestos a modo de ejemplo) se tiene una caída de 1,69V que se traduce en 0,845V por diodo ya que se ha mencionado que siempre se encuentran 2 diodos activos simultáneamente.



Gráfica 2: Tensiones en la simulación del puente

A pesar de ser unos valores arbitrarios, se esperan unas caídas de tensión muy similares en el proyecto, lo cual puede afectar a la hora de cargar la batería y habría que buscar una solución para elevar la tensión. Para tensiones más altas, las caídas se pueden despreciar, pero como se explicará, la tensión a la que se carga la batería estará entre 9 y 16 voltios por lo que 2 voltios de diferencia pueden afectar mucho y no son despreciables. Concretamente la batería será de 12V.

Una vez explicado el funcionamiento de un puente rectificador, se han realizado simulaciones con el motor a emplear en el proyecto para ver la tensión que obtenemos nada más salir del puente (sin filtro paso bajo). Conectando una fuente de corriente a la salida del puente de 5 A.



Gráfica 3: Tensión sin filtrar a la salida del puente

En este caso vemos una caída de tensión de 1.7V que será la que tendremos en nuestro proyecto. Al ser una tensión más parecida a una trapezoidal que una senoidal, el rizado es menor que en la simulación genérica que se hizo para la explicación del puente. Sin embargo, se pretende colocar un condensador a modo de filtro para aplanar dicho rizado y que la carga en la batería sea más adecuada.

2.2.3 Convertidor reductor

Esta es una parte crucial del proyecto ya que en ella reside el control del sistema y es por ello por lo que es necesario usar un convertidor adecuado.

Lo primero a tener en cuenta es lo que debemos controlar y esto es la corriente. Inicialmente se planteó la idea de usar la corriente que sale del puente antes mencionado. Esto se debe a que esta corriente está directamente relacionada con el par que se le solicita al ciclista (par que dependerá de lo que solicite el deportista en cada momento, mediante una botonera). Sin embargo, posteriormente se vio más interesante controlar la corriente que circula por la batería. De esta forma aseguramos que la corriente por la batería es adecuada para no superar sus límites reduciendo su vida útil. Por ello serán necesarias una serie de ecuaciones para relacionar ambas corrientes mencionadas.

Dentro de los convertidores hay varios tipos, dado que ya hemos convertido la tensión a DC con los componentes anteriores, usaremos un convertidor DC-DC reductor. Podría emplearse un convertidor elevador-reductor (Buck-Boost), pero esto complicaría los cálculos y simulaciones y al tener una batería de no muy alto voltaje se podrá usar un reductor de forma que, en el rango de funcionamiento adecuado, el voltaje en el lado de la batería siempre sea inferior a la tensión en la entrada del convertidor. Esto lleva el inconveniente de que, si la tensión no es suficiente en el lado del ciclista, el circuito no funcionará adecuadamente. Dicha tensión se ha calculado de 13V, por lo que con poca velocidad (unas 60 rpm) el circuito funcionará correctamente.

Se podría estudiar un mecanismo sofisticado de piñones que cambie automáticamente cuando la velocidad no sea suficiente, haciendo así que, a bajas velocidades del ciclista, el motor siga con velocidad suficiente para el correcto funcionamiento del circuito.

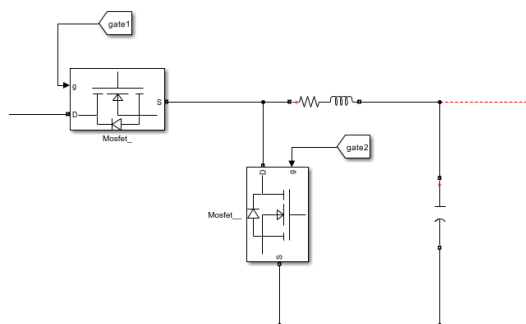


Figura 7: Convertidor reductor simulink

Por todo esto se decide utilizar el reductor de la Figura 7, sencillo para los cálculos, pero eficaz para el uso que tiene tal y como se verá posteriormente en las simulaciones. En dicho reductor vemos 2 mosfets, una bobina con su resistencia y un condensador en paralelo el cual ayudará a que la tensión en la batería sea continua.

Llamando V_s a la tensión en la entrada del convertidor y V_o a la tensión en el condensador, queda la siguiente ecuación:

$$V_o = V_s \cdot D \quad (1)$$

En la ecuación (1) el factor D es el ciclo de trabajo o factor de servicio. Toda la información necesaria para entender el funcionamiento de dicho reductor se puede encontrar en el libro de electrónica de potencia [3] escrito por Daniel W. Hart. En el encontramos los convertidores más comunes entre los que se encuentra el que se emplea en este proyecto.

Se verá más adelante en el proyecto, pero cabe destacar que será necesario utilizar 2 de estos reductores (como ya se ha mencionado) ya que habrá casos en los que la batería no pueda consumir toda la potencia generada por el ciclista y por ello habrá que crear un circuito auxiliar idéntico al primario, sustituyendo la batería por una resistencia de frenado.

2.2.4 Batería

En una bicicleta estática existe un disco cinético que ofrece resistencia al pedaleo. Al retirar este disco para conectar el BLDC no hay nada que ofrezca resistencia y se tiene que conectar una carga. Dicha carga será principalmente una batería y el diseño será ajustado para ello, mientras que la energía sobrante será llevada al circuito de la resistencia de frenado.

Existen muchos tipos de baterías, inicialmente se pretendía usar una batería de ion-litio. Estas baterías están siendo muy usadas, especialmente en el mundo automovilístico donde cada vez son más importantes. Contaminan poco, salvo en el momento en el que son fabricadas, y por ello parecían ser ideales para un proyecto que pretende contribuir con el medioambiente. A pesar de ello, son baterías delicadas, necesitan una carga muy constante y dado los cambios de velocidad del ciclista además del par solicitado, es necesario buscar otra alternativa más robusta.

La solución se encuentra en una batería de gel (batería plomo-ácido en la que el electrolito líquido se reemplaza por un gel espeso). Dichas baterías son más flexibles con la corriente de carga admitiendo un mayor rango en la corriente de carga. Además de esto encontramos,

Ventajas:

- Menor riesgo de fugas, estando el electrolito en forma de gel, dificulta la posibilidad de fuga, evitando así la contaminación del suelo y posibles lesiones a las personas.
- Durabilidad, esto hace que requiera menos mantenimiento o reemplazo que significaría tener a alguien pendiente en el gimnasio.

Desventajas:

- El plomo es un metal pesado que puede ser tóxico para el medioambiente.
- Al igual que en las baterías de ion-litio en el proceso de fabricación se puede contaminar con la extracción del plomo si no se hace adecuadamente.
- En este proyecto interesa que la batería sea de menor voltaje posible (por el convertidor reductor). Sin embargo, en el mercado encontramos baterías de 12 o 24V, por lo que se debe tener esto en cuenta en los límites de funcionamiento.

El funcionamiento de las baterías de plomo se basa en una reacción química que tiene lugar entre el plomo y el ácido sulfúrico. Esta reacción genera la diferencia de potencial que nos permite obtener energía.

En el control del circuito se tendrá en cuenta unos límites de funcionamiento de la batería de forma que el convertidor tenga en cuenta la corriente y no deje que sea mayor del máximo admisible. Para saber la máxima corriente que puede circular por la batería, se debe calcular entre un 15 y 25% de la capacidad de esta (siendo un máximo de 50% para este tipo de baterías) [4]. Por esto, saturaremos la referencia de corriente de la batería a un 25% de la capacidad.

Se ha mencionado la necesidad de conectar una carga para que absorba la energía producida por el ciclista que no pueda consumir la batería. Es por ello por lo que se conecta una resistencia de frenado en paralelo en un circuito idéntico al de la batería para que la resistencia disipe energía en forma de calor y el deportista pueda continuar haciendo esfuerzo independientemente del nivel de carga de la batería.

La cantidad de energía que consumirá la batería o la resistencia será controlado por los convertidores reductores de cada circuito mediante el microprocesador tal y como se explicará más adelante.

Dado que el microprocesador necesita energía para funcionar, sería importante dejar siempre suficiente nivel de carga para que pueda funcionar. En caso de descargar por completo la batería, debemos dejar siempre abierto de forma mecánica el convertidor de forma que al pedalear la corriente circule por la batería y no por la resistencia. Si circulase por la resistencia el microprocesador no se encendería sin una fuente exterior y el sistema no funcionaría correctamente.

3. Funcionamiento y cálculos

Una vez diseñado el sistema se utilizó la herramienta de Matlab simulink para simular el funcionamiento. De esta manera se fue utilizando el método de ensayo y error para sacar los valores aproximados de todos los componentes además de parametrizar el generador. Sin embargo, el simulador tiene un problema, hace incompatible el generador y el convertidor ya que están en librerías distintas. La solución ha sido realizar 2 simulaciones, en la primera encontramos el generador (accionado por la velocidad del ciclista) seguido del puente rectificador y un condensador a modo de filtro paso bajo para eliminar el rizado de la tensión lo suficiente para tener tensión DC. De no eliminar este rizado, se tendrían problemas con el convertidor DC-DC. En la segunda se encuentra el control y consumo del sistema.

3.1. Generador

A la hora de elegir el generador se encontraba el problema de que la mayoría de los proveedores ofrecían pocos datos sobre este. Por ello, se pretende utilizar un modelo que se encuentra dentro de las librerías del simulador (en los siguientes apartados se concretará que modelo se utiliza). Siendo así, se puede comprobar el funcionamiento de dicho generador a diferentes revoluciones.

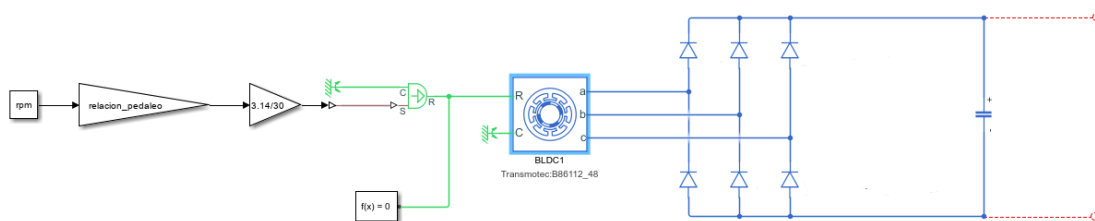


Figura 8: Simulación del generador (Simulink)

En la Figura 8 se encuentra lo siguiente:

- El primer bloque (rpm) indica las revoluciones a la que pedalea el ciclista.
- Esta velocidad es relativamente pequeña para el motor por lo que será necesario añadir un piñón mecánico que aumente la velocidad y esto es simulado por la primera ganancia (primer bloque triangular “relación_pedaleo”) con un valor de 18,75. Dicho valor se ha calculado comprobando con el simulador diferentes ensayos. Según una revista deportiva [5] el rango de pedaleo de un ciclista (entre principiantes y profesionales) está entre 60 y 110 rpm. Por su lado, otra revista sobre la salud del deporte [6] indica que en un entrenamiento se debe ir entre 90 y 120 rpm. Por ello se ha tomado la decisión de que el rango que se va a tener en nuestro gimnasio será de 60 a 140 rpm para tener en cuenta los posibles acelerones repentinos por algún deportista. En caso de salirse de ese rango se deberá (mediante el microprocesador) abrir el circuito de la batería para que esta no se dañe y con la resistencia de frenado intentar llegar a los requerimientos del ciclista en cuanto a la intensidad solicitada. Sin embargo, fuera de esos rangos no funcionará adecuadamente por las limitaciones de los componentes. La información de los ensayos vista en una hoja Excel permite ver que la relación de pedaleo es adecuada.

- El siguiente bloque triangular es la relación para pasar de rpm a rad/s que es con las unidades que trabaja el generador.

$$1rpm = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot rad/s \quad (2)$$

- A continuación, en verde se encuentra el bloque que genera el movimiento de ciclista.
- El generador BLDC está conectado al bloque anterior que genera el movimiento y a una referencia que indica que no hay movimientos relativos.
- La salida del generador (3 cables) que van conectados al puente de diodos que se encarga (como ya se ha mencionado) de convertir las 3 tensiones en una sola con cierto rizado.
- Para reducir ese rizado mencionado se conecta el condensador que encontramos al final de la imagen. Este condensador se ha dimensionado con ensayo y error, viendo que a bajas revoluciones filtra un poco peor como es de esperar, pero dicho filtrado es suficiente con un condensador de $720 \mu F$. En las líneas discontinuas se debería conectar los circuitos de control con batería (Figura 9) y con resistencia de frenado (Figura 10).
- Para la simulación del generador se conectará una fuente de intensidad para simular diferentes valores, sustituyendo así ambos circuitos de batería y resistencia de frenado (Figura 13).

3.2. Control y consumo

En este apartado se va a ver la parte con mayor complejidad del proyecto. Como ya se ha dicho se va a emplear un convertidor reductor. Sin embargo, en el sistema final dispondremos de 2 circuitos conectados al motor, uno con la batería y otro con la resistencia de frenado. El diseño y los cálculos se realizan con el circuito de la batería y se utilizará el mismo convertidor para la resistencia, cambiando los controles como se verá a continuación.

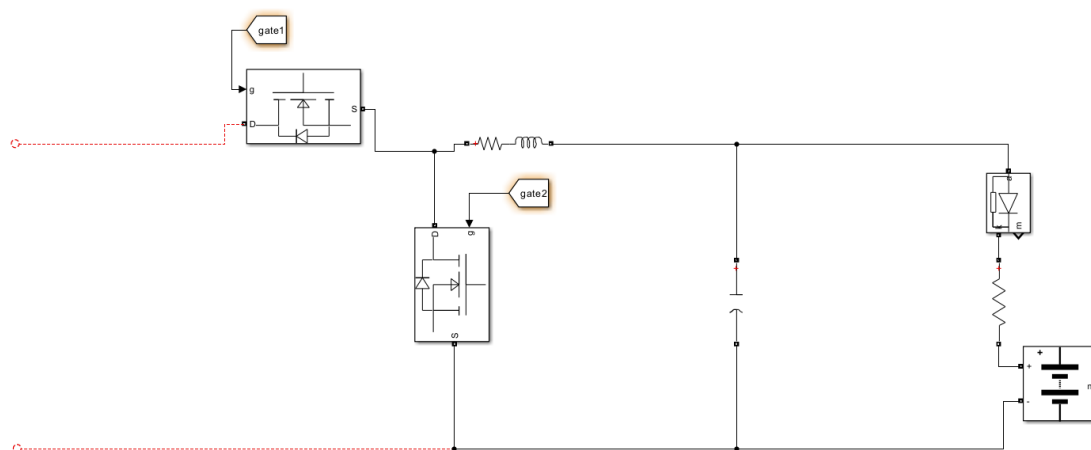


Figura 9: Simulación control del circuito de la batería

El convertidor está formado por:

- 2 mosfets cuyo funcionamiento esta determinador por las etiquetas “gate1” y “gate2” que les indican el factor de servicio con el que trabajar. Dichas etiquetas están conectadas a los controles PI que se verán en este apartado.
- Una bobina de $330\mu H$ con una resistencia interna de $0,5\Omega$.
- Un condensador de $600\mu F$

A la salida del convertidor conectamos la batería, en serie con una pequeña resistencia de $0,1\Omega$ (dicha resistencia ayuda a limitar la corriente, evitando picos que puedan dañar la batería) y un diodo por seguridad para la batería. En su defecto, en la Figura 10 se cambian estos 3 componentes por una única resistencia de un 1Ω que sea capaz de disipar los casi $400W$ que puede generar como máximo el generador. La potencia generada por el ciclista seguramente sea inferior, pero conviene utilizar esos valores para no quemar los dispositivos.

La resistencia mencionada (aunque se concreta más adelante el modelo) tiene una dimensión de unos $60 \times 60 \text{ mm}^2$ por lo que se podría acoplar en cualquier superficie de la bicicleta. Por otro lado, habrá que diseñar su colocación de forma que se refrigerará de alguna manera ya que puede alcanzar temperaturas de 85°C . Se intentará buscar la manera de hacerlo sin dispositivos que consuman electricidad para así poder dirigir toda la potencia a la batería.

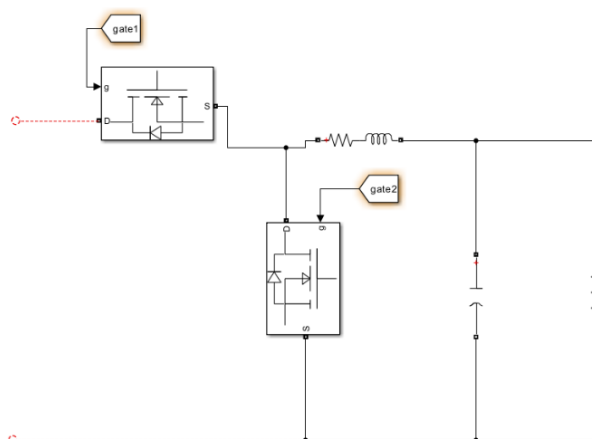


Figura 10: Simulación control del circuito de la resistencia

Dichos circuitos estarán en paralelo, ambos conectados al puente rectificador de la Figura 8: Simulación del generador (Simulink), de forma que controlan la corriente que circula desde el generador (como se ha mencionado dicha corriente está directamente relacionada con el par del ciclista).

3.2.1 Control PI

Se procede a diseñar el control PI, para ello se necesita la planta del sistema. Se calcula la tensión media del convertidor, previo a la bobina, como $V_d = D \cdot V_{in}$. Siendo D el factor de servicio, V_d la tensión a la salida del convertidor y V_{in} la tensión a la entrada de este. Llamando V_{out} a la tensión entre el diodo y la batería (o la tensión de la resistencia de frenado en el otro circuito), obtenemos en la bobina:

$$L \frac{di_L}{dt} = -R_L \cdot i_L + V_d - V_{out} = -R_L \cdot i_L + X \quad (3)$$

En el modelo, la entrada que podemos manipular es X y la variable que se pretende controlar es i_L (corriente por la batería). Por lo que la función de transferencia entre $X(s)$ e $i_L(s)$ es:

$$P(s) = \frac{i_L(s)}{X(s)} = \frac{1}{L \cdot s + R_L} \quad (4)$$

Con un regulador PI se obtiene la siguiente función de transferencia en lazo abierto:

$$G(s) = K \frac{1 + I \cdot s}{I \cdot s} \cdot \frac{1}{L \cdot s + R_L} \quad (5)$$

Por lo que en lazo cerrado quedaría (siendo b la ponderación a referencia):

$$F(s) = K \frac{(b \cdot I \cdot s + 1) \cdot \frac{1}{I \cdot L}}{s^2 + \left(\frac{R_L + K}{L}\right) \cdot K + \frac{K}{I \cdot L}} \quad (6)$$

Dado que se ha diseñado con X , se deberá tener en cuenta a la hora de obtener el factor de servicio D .

Una vez conocida la función de transferencia se les dan valores a los componentes físicos del circuito, concretamente:

- $L = 330 \mu H$
- $C = 600 \mu F$
- $R_1 = 0,1 \Omega$
- $R_2 = 1 \Omega$

Estos valores son elegidos de los valores de bobinas y condensadores comerciales que se pueden encontrar fácilmente. En ambos circuitos se usa el mismo valor de henrios y faradios mientras que en el circuito de la batería, la resistencia tiene un valor muy pequeño ya que su función es proteger a la batería y en el otro circuito su función es sustituir dicha batería.

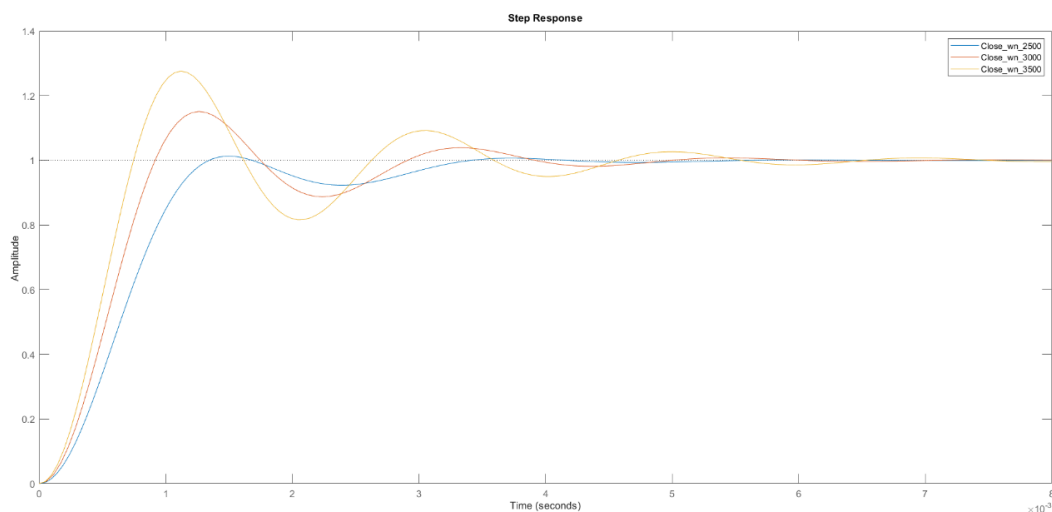
Para las constantes del control (siendo “ K ” la ganancia del control proporcional e “ I ” la del control integral) se obtendrán de las ecuaciones de un control PI:

$$K = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot L - R_L \quad (7)$$

$$I = \frac{K}{\omega_n^2 \cdot L} \quad (8)$$

Siendo las mismas constantes para ambos circuitos. En estas ecuaciones se ha despreciado el efecto del condensador ya que se ve en la simulación que siguiendo dichos valores el control funciona adecuadamente.

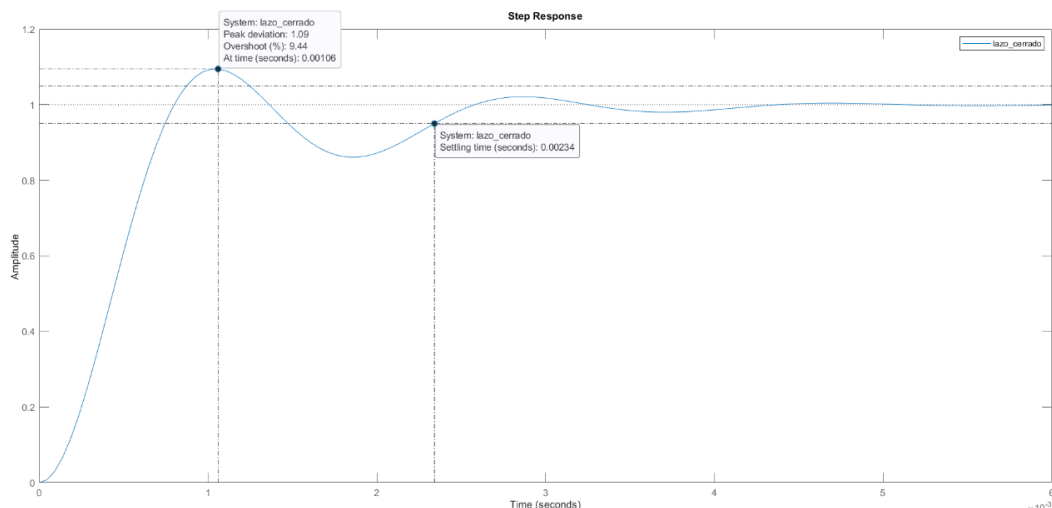
Hecho esto e iterando con diferentes valores de pulsación natural (ω_n) y de factor de amortiguamiento (ζ) tal y como se puede observar en las 2 primeras gráficas del Anexo A: Gráficas se llega a la conclusión de que pequeñas variaciones no afectan en gran medida al proyecto ya que el tiempo en el que se actúa es demasiado corto como para que el ciclista sea capaz de notarlo. Sin embargo, se ha intentado coger los valores más adecuados. Empezando por la pulsación natural, en la Gráfica 4 se han aislado las w_n que mejor se aproximaban al objetivo buscado. Entre las 3 no hay gran diferencia de tiempo ya que alcanzan el valor de referencia en milésimas de segundo. Por ello se ha elegido una $w_n = 3000 \frac{rad}{s}$ ya que el sobrepaso que obtenemos no es exagerado, aunque como se ha mencionado se podría realizar también con otros valores siendo el resultado muy similar.



Gráfica 4: Función de transferencia del lazo cerrado con distintas pulsaciones

Con el mismo procedimiento se escoge una $\zeta = 1$ dando como resultado una respuesta en frecuencia de lazo cerrado con un 9,44% de sobrepaso y un tiempo de establecimiento al 5% de tan solo 2,34 ms (Gráfica 5).

Con estos datos ya se tiene definido por completo el circuito y todos sus componentes tanto electrónicos como de control en el microprocesador que se deberá instalar.



Gráfica 5: Respuesta en frecuencia del lazo cerrado

3.2.2 Referencia del control PI

Aunque ya se ha mencionado, en este apartado se hará hincapié en la referencia que debe seguir nuestro control, siendo esta, la corriente que pasa por nuestros consumos. Sin embargo, lo que realmente queremos controlar es la corriente a la salida del puente rectificador por lo que será necesario realizar una serie de relaciones uniendo ambas corrientes con la potencia del circuito ya que al no tener otro consumo la potencia activa que genera el BLDC debería ser la consumida por la resistencia y la batería.

Por lo tanto, tendríamos que la potencia del generador es igual a la consumida por la batería:

$$P_{gen} = U_s \cdot I_s = P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} \quad (9)$$

Sin embargo, la batería tiene sus límites y debemos ponerle un bloque de saturación para que no sobrepase ciertos valores de corriente. Cuando la corriente por la batería llega a su máximo y se quiere seguir aumentando la corriente, se activa el circuito de la resistencia de frenado, disipando la energía en forma de calor.

$$P_{resistencia} = P_{gen} - P_{bat} = U_r \cdot I_r \quad (10)$$

Quedando así que la resistencia I_s es la referencia marcada por el ciclista (relacionado con el par que quiere ejercer), mientras que las referencias de los controles son I_{bat} e I_r respectivamente. Todo esto mencionado se muestra en la Figura 11, en la cual podemos ver también que se ha incluido un interruptor que detecta cuando la batería está llena y abre el circuito haciendo que la referencia de esa corriente sea 0.

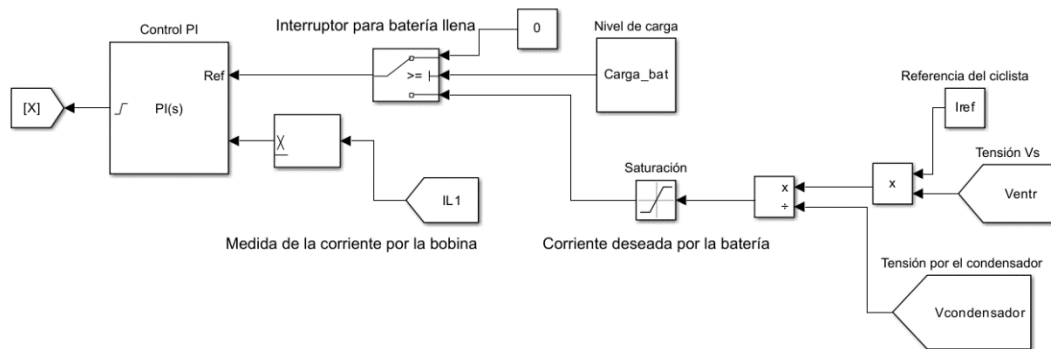


Figura 11: Simulación de las ecuaciones de control principal

Empezando desde la derecha, tenemos el bloque I_{ref} que se trata de la corriente elegida por el ciclista la cual multiplicando por la tensión denominada V_s o V_{entr} (tensión a la salida del puente trifásico) obteniendo así P_{gen} . Dividiendo por la tensión del condensador se obtiene la corriente que tiene que pasar por la batería, es decir, la corriente de referencia del control (con su correspondiente bloque que satura esta corriente). Introduciendo dicha corriente de referencia por la batería y la lectura real de la corriente (IL1) que circula por la batería en el bloque del control PI, obtenemos X. Como se ha mencionado anteriormente es la variable que controlamos con el convertidor, por lo que deberemos realizar la siguiente operación para obtener el factor de servicio (siendo $V_{condensador} = V_{out}$ mencionada previamente):

$$\frac{X + V_{condensador}}{V_{entr}} = D_1 \rightarrow \text{Factor de servicio} \quad (11)$$

Una vez se tiene el factor de servicio se conecta a una señal PWM (con periodo igual a la inversa de la frecuencia de conmutación, f_s) con la cual se puede hacer que ambos MOSFETs funcionen adecuadamente. Con esto se controla la tensión a la salida del convertidor de forma que, conociendo la tensión por la batería, así como la pequeña resistencia que tiene en serie, se estará controlando la corriente por la batería.

Para el segundo circuito se ha empleado la ley de Joule $P = I^2 \cdot R$ en el lado de la resistencia. En el circuito anterior era más sencillo usar sensores de corriente y tensión ya que no se tiene una resistencia constante, sino una batería.

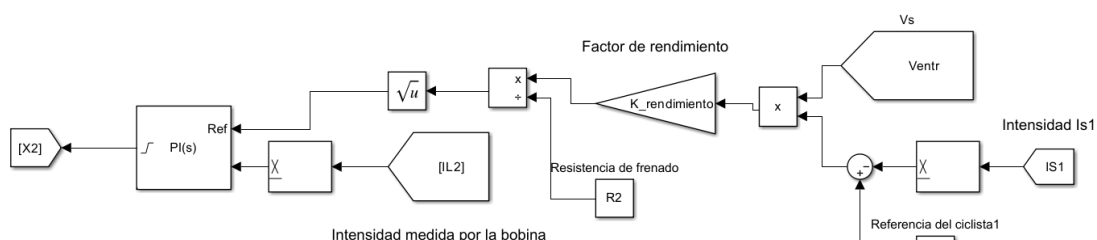


Figura 12: Simulación de las ecuaciones del control secundario

En la Figura 12, a la derecha, se tiene la intensidad I_{s1} , siendo esta la intensidad que sale del BLDC y circula hacia la batería. Si a dicha intensidad se le resta la referencia del ciclista

(intensidad total saliente del generador), obtenemos la corriente que queremos que circule desde el BLDC hasta nuestro circuito con la resistencia de frenado. Al multiplicar dicha corriente por la tensión V_s , se obtiene $P_{gen} - P_{bat}$ que es la potencia que queremos que consuma la resistencia. La resistencia de frenado tiene un valor constante de $R_2 = 1\Omega$, por lo que se puede dividir y hacer la raíz cuadrada quedando como resultado la corriente que va a circular por la resistencia R_2 .

$$P_{gen} - P_{bat} = V_{entr} \cdot (I_{ref} - I_{s1}) = I_{R_2}^2 \cdot R_2 \rightarrow$$
$$\rightarrow I_{R_2} = \sqrt{\frac{P_{gen} - P_{bat}}{R_2}} = \sqrt{\frac{P_{R_2}}{R_2}} \quad (12)$$

Al igual que en la Figura 11, se obtiene un factor X_2 que al sumarlo con la tensión de la resistencia (V_{R_2}) y dividirlo entre la tensión de entrada se obtiene el factor de servicio D_2 (al cual se le conectará una señal PWM con periodo igual a la inversa de f_s para controlar los MOSFETs).

$$\frac{X + V_{resistencia\ frenado}}{V_{entr}} = D_2 \rightarrow \text{Factor de servicio} \quad (13)$$

En la Figura 12 destaca un bloque que no se ha mencionado, el factor de rendimiento. Todo lo que se ha mencionado en este apartado, parte de la hipótesis de un circuito ideal donde no hay pérdidas. Pero esto no es así y es por ello por lo que se coloca dicho factor ya que la potencia generada por el BLDC no es exactamente la que consumen entre la batería y la resistencia. Dependiendo de la velocidad del ciclista y de la corriente solicitada por el mismo, las pérdidas varían por lo que con este método no se podrá conseguir eliminar por completo el error de seguimiento. Es decir, habrá momentos en los que la corriente solicitada por el ciclista no sea la que sale por el generador.

Cabe destacar que el ciclista no entiende de corrientes a la hora de pedalear, es decir, no sabe qué significado tienen 7 A, más bien irá solicitando mayor corriente en función de que quiera hacer mayor o menor esfuerzo, por lo que el error en el seguimiento de la referencia no tendrá mucha importancia siempre y cuando sea constante.

Como alternativa al factor de corrección (o complementario) se podría incluir un tercer PI de modo que el sistema sea más sofisticado, erradicando así el error de seguimiento.

4. Resultados y simulaciones

Dado que, como se mencionó anteriormente, el programa empleado para la simulación no permitía realizar todo el proyecto en una simulación, se procede a ver los resultados de las dos partes de la simulación.

4.1. Simulación del circuito generador

En la simulación del generador se ha colocado una fuente de intensidad que simula todo el control de corriente de la otra parte de la simulación. De esta forma podemos ver cómo funciona el generador a distintas corrientes en función de la velocidad.

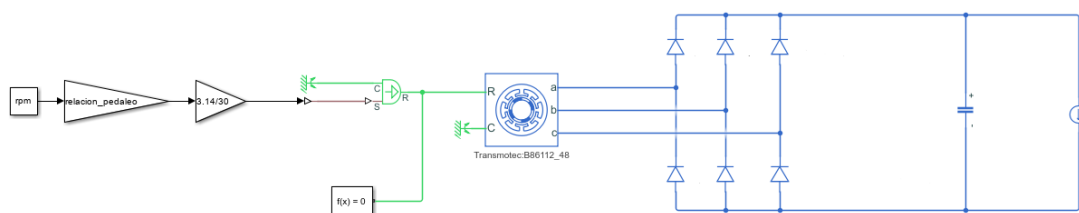
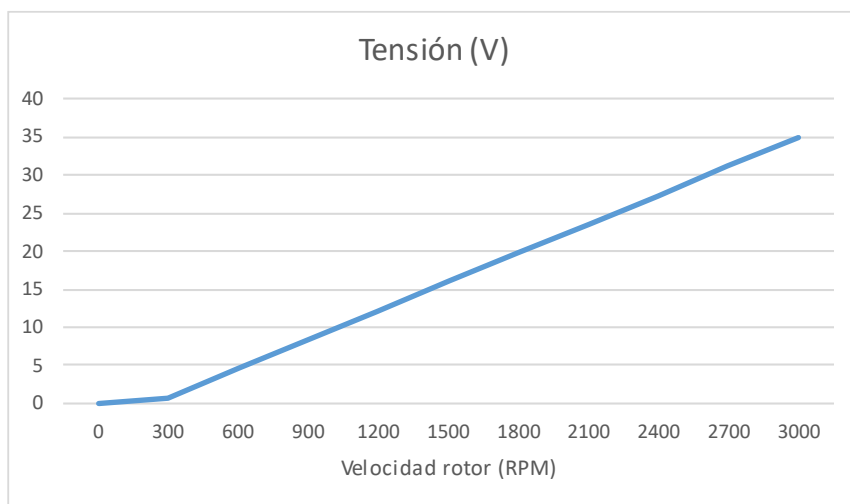


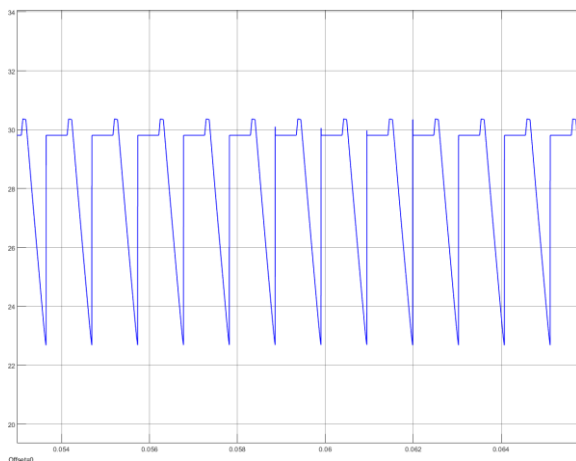
Figura 13: Simulación generador con fuente de corriente

Con dicho circuito de la Figura 13 se procede a hacer una serie de simulaciones para ver el funcionamiento del BLDC ya que todos los datos que facilita el fabricante son a modo motor y no generador. Dichos valores calculados están en las tablas del Anexo A, un ejemplo es la Gráfica 6 a través de la cual vemos que la tensión generada y la velocidad del pedaleo del ciclista tienen una relación directamente proporcional, es decir a mayor velocidad, mayor tensión y viceversa.

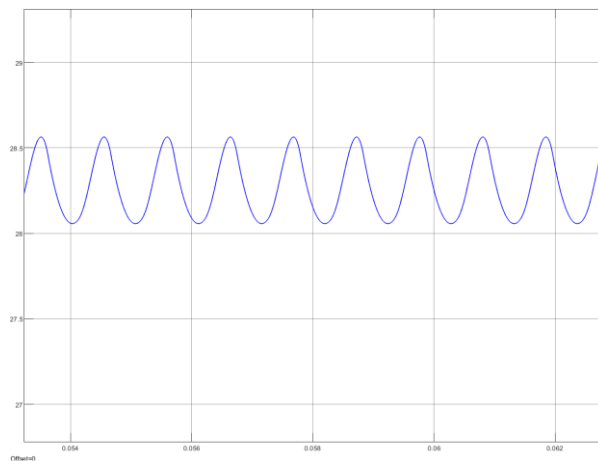


Gráfica 6: Relación tensión-rpm del BLDC con corriente constante 10 A

Además, en esta parte de la simulación se observa el diseño del filtro paso bajo (apartado 3.1) y la caída de tensión provocada por el puente rectificador trifásico.



Gráfica 7: Tensión después del puente rectificador
(sin FPB)



Gráfica 8: Tensión después del puente rectificador
(con FPB)

En las gráficas superiores se observa la tensión resultante después del puente rectificador trifásico al aplicarle al rotor del BLDC una velocidad de 2400 rpm y conectando una fuente de intensidad de 7,5 A:

- En la Gráfica 7 se muestra la simulación sin un condensador conectado a modo de filtro. Se observa la tensión resultante con $\Delta U \approx 8V$ y una tensión máxima de 30,5V.
- En la Gráfica 8 se ha añadido el efecto de un condensador de $720\mu F$. Con ello se ven claras diferencias, la primera y más visual es que se pasa a tener una tensión senoidal con la que es mucho más sencillo trabajar que con la que se tenía previamente. En este caso el rizado disminuye siendo de tan solo 0,5V aproximadamente con lo cual nuestro circuito controlador sí podrá trabajar. Sin embargo, se ve una caída de tensión la cual podemos despreciar. El condensador seleccionado se ha elegido con valores comerciales típicos, en caso de requerir un menor rizado se podría colocar otro condensador en paralelo de forma que se sumen sus capacitancias.

$$\text{Frecuencia de corte} \rightarrow f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C} \quad (14)$$

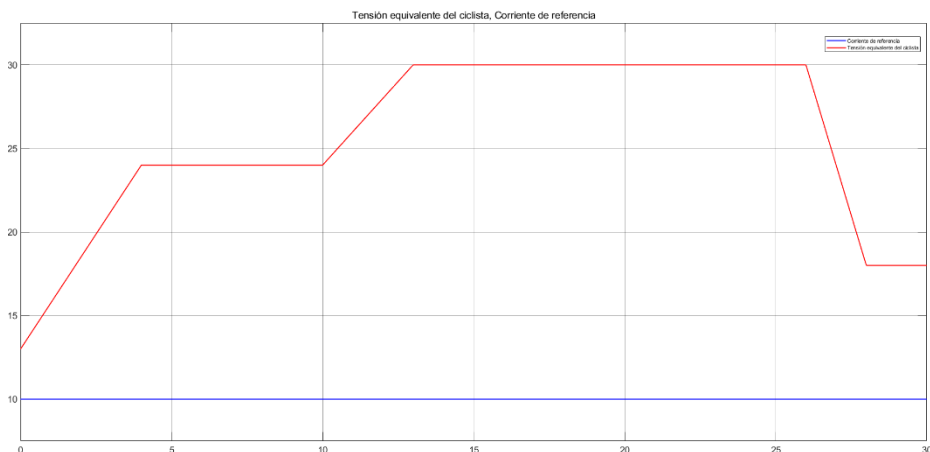
$$\text{Suma de } C \text{ en paralelo} \rightarrow C_{total} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (15)$$

Cabe destacar que, a diferentes velocidades del ciclista, la frecuencia del motor variará, haciendo que el filtro actúe de mejor o peor manera. Dicha diferencia no debería suponer un problema para el correcto funcionamiento de la otra parte del circuito.

4.2. Simulación del circuito de control y batería y límites de funcionamiento

Una vez establecidos los valores con los que trabajará el generador se procede a realizar los ensayos con la otra parte del circuito. Al no poderse unir ambos circuitos en el programa utilizado, se asume una fuente de tensión continua en la entrada que será similar al resultado de la otra simulación.

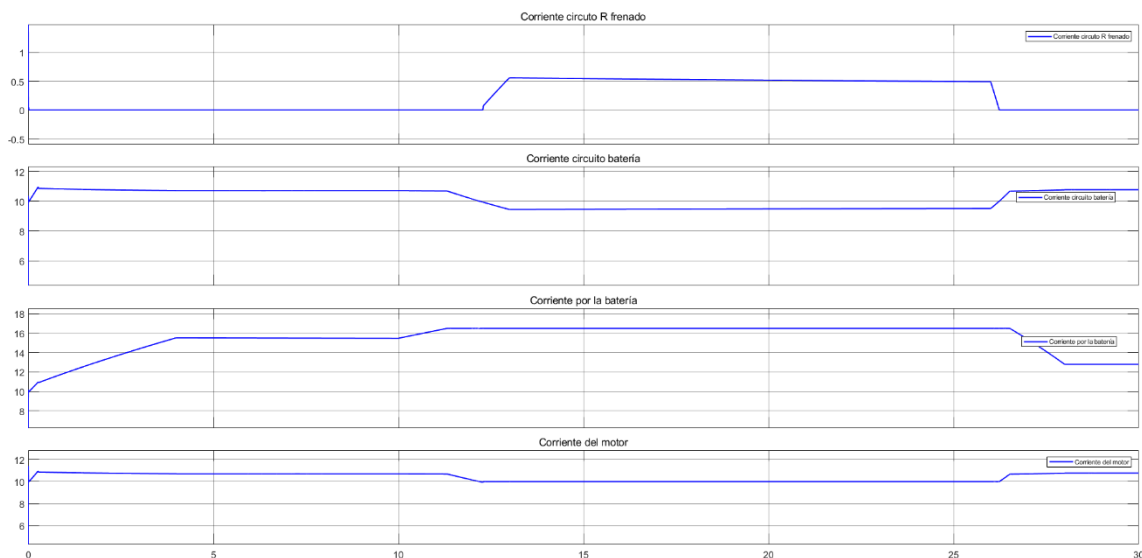
A continuación, se mostrará un ejemplo de cómo funcionaría el sistema, en la Gráfica 9 se observan los valores que se le han dado a la simulación (tensión de entrada y corriente de referencia marcada por el ciclista).



Gráfica 9: Datos de entrada en simulación de control a referencia constante

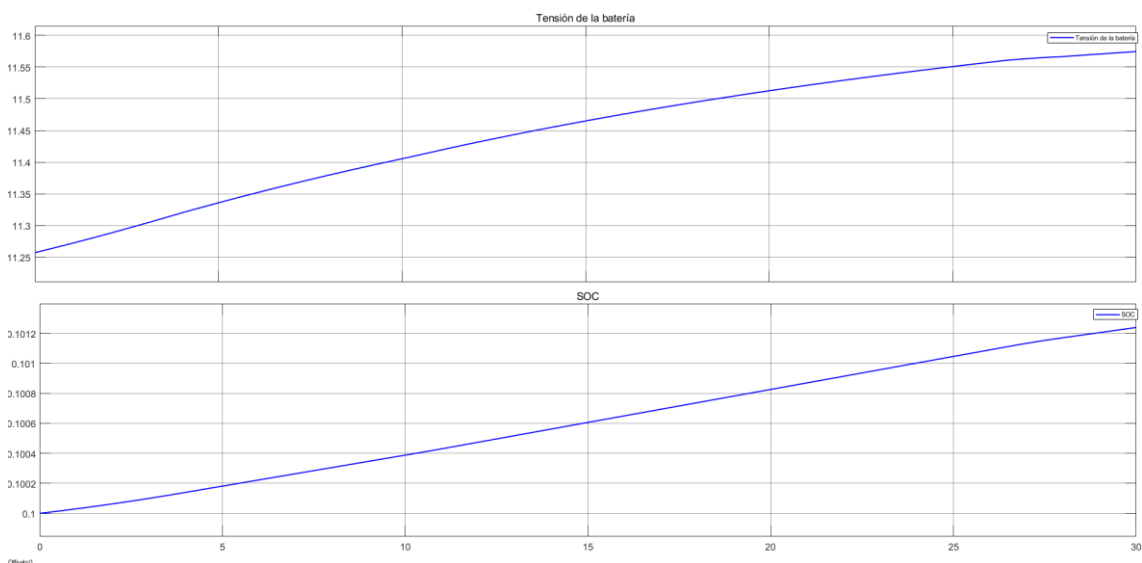
En la simulación de la Gráfica 9 se ha establecido una referencia constante de 10 A (corriente saliente del generador) y se ha ido cambiando la tensión con rampas de tensión. El resultado de esta simulación en las corrientes del circuito se ven reflejadas en la Gráfica 10. De arriba hacia abajo se observa: corriente que circula desde el generador hacia el circuito de la resistencia de frenado, la corriente que circula desde el generador hacia el circuito de la batería, la corriente que circula por la batería y la suma de las 2 primeras (es decir, la corriente del generador).

En dicha gráfica se observa que el control funciona adecuadamente de forma que, ante cambios de velocidad, el ciclista no siente ningún cambio en el par que tiene que aplicar (corriente del generador, última gráfica). Por su lado, la corriente que circula por la batería sí aumenta conforme aumenta la velocidad, esto se debe a que la tensión por la batería es prácticamente constante por lo que para mantener la potencia del circuito se debe aumentar dicha corriente. Para comprobar que el circuito de la resistencia de frenado funciona adecuadamente se ha simulado con una corriente admisible por la batería de 16,5 A (menor de la definida). Se ve como efectivamente empieza a actuar cuando ya no puede circular más corriente por la batería y desactiva cuando dicha corriente disminuye.



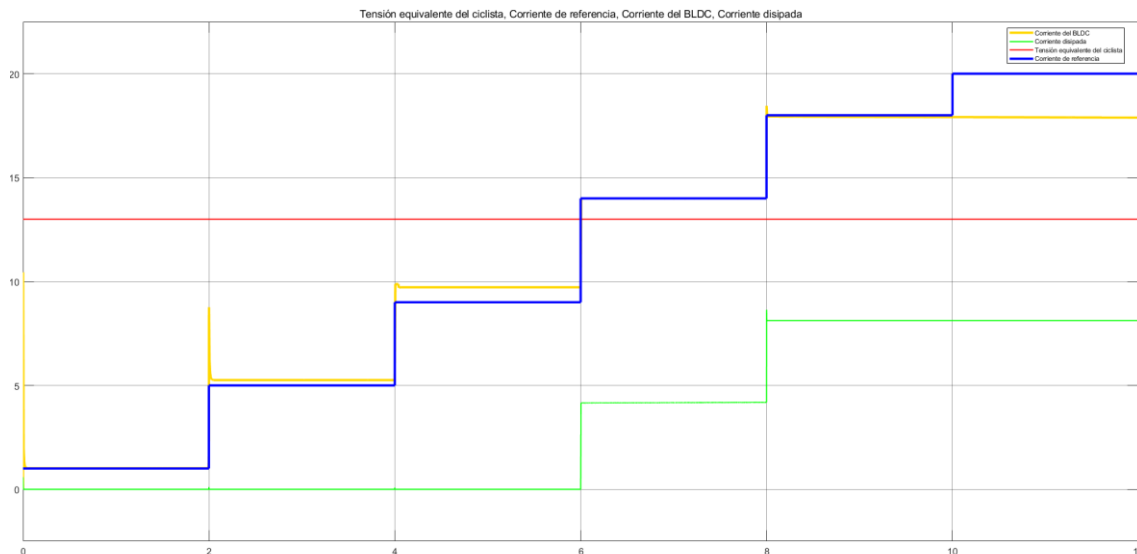
Gráfica 10: Actuación del control PI, en las corrientes, ante cambios (rampas) en la tensión de entrada

A pesar de solo simular durante 30 segundos, en la Gráfica 11 observamos como la tensión sube a la vez que aumenta el nivel de carga (empezando en un 10% llega hasta un 10,012%). Por lo que se puede ver que funciona adecuadamente.



Gráfica 11: Datos de la batería durante 30 segundos de funcionamiento

A continuación, se pone a prueba la simulación para comprobar los límites de funcionamiento. Dado que, a mayor tensión en el lado del ciclista, mejor funciona el convertidor reductor, la tensión máxima viene dada por el BLDC (aplicando la caída de tensión del puente queda en unos 34V). Para que el convertidor funcione, la tensión mencionada debe ser mayor a 13V (dado que la batería es de 12V). Por tanto, fijando la tensión en el peor de los casos se ha realizado un ensayo modificando la corriente de referencia:



Gráfica 12: Límites de funcionamiento idóneo

En la Gráfica 12 se observa en azul la referencia de corriente y en amarillo la corriente por el BLDC. En rojo se observa la tensión constante de 13V mientras que con la verde se observa la corriente disipada por la resistencia de frenado.

Por lo tanto, se puede concluir que el proyecto funciona correctamente para los siguientes parámetros:

- Tensión
 - Valor mínimo 13V.
 - Valor máximo (definido por el BLDC) 34V.
- Corriente
 - Valor mínimo 1 A.
 - Valor máximo sin disipar corriente 9 A.
 - Valor máximo 18 A (9 por el circuito de la batería, 9 disipados)

Cabe destacar que, a menor corriente de referencia, menor es la corriente que circula por la batería por lo que la carga sería muy lenta (casi nula en algunos casos).

5. Diseño mecánico y montaje

Estando la mayor parte del proyecto relacionada con el sector eléctrico y electrónico, debemos de tener en cuenta que se trata de una bicicleta estática y que habrá ciertos componentes mecánicos que se deben diseñar, especialmente los piñones que nos darán la relación velocidad de pedaleo y velocidad del generador.

5.1. Plato-Piñón y cadena

En este proyecto se fijará una relación de 18,75 que ya se mencionó anteriormente. Es decir, por cada vuelta que gire el plato, el piñón dará 18,75 vueltas.

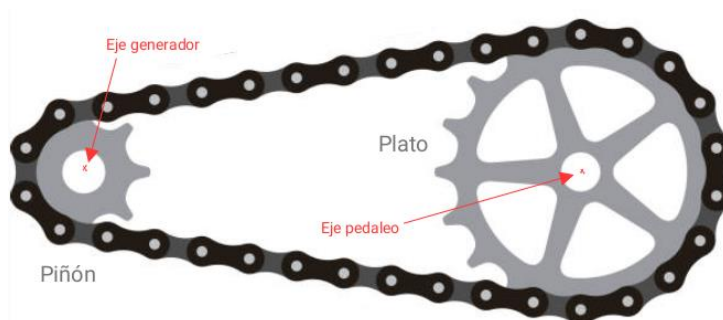


Figura 14: Montaje plato-piñón y cadena

Por lo tanto, necesitaremos un plato y un piñón cuya relación de transmisión sea 75:4. Se podrá fabricar en el laboratorio de la universidad para abaratar gastos ya que no tiene mucha complicación (usando por ejemplo el corte mediante chorro de agua). Además, dado el alto coeficiente (casi 19), sería complicado encontrar un comerciante de componentes de bicicleta que venda este tipo de platos y piñones. Por este motivo y para que el piñón no sea extremadamente pequeño se usará una relación plato-piñón 8:150.

En el laboratorio de la universidad se dispone de aluminio y acero. Se utilizará acero ya que este tiene una mayor resistencia, aunque convendría cierto mantenimiento para evitar la oxidación.

Respecto al diámetro del plato y piñón, cabe destacar que el paso de la cadena (distancia entre pines) suele ser de 12,7mm por lo que nos quedarían unos diámetros:

$$Diametro_{plato} = \frac{150 \cdot 12,7}{\pi} = 606,4 \text{ mm} = 60,64 \text{ cm} \quad (16)$$

$$Diametro_{piñón} = \frac{8 \cdot 12,7}{\pi} = 32,34 \text{ mm} = 3,234 \text{ cm} \quad (17)$$

Se observa que los tamaños son muy inusuales para este tipo de mecanismos. Por lo que se busca otra alternativa. La solución a este problema se encuentra en usar un engranaje epiciclodial (también conocido como engranaje planetario). Esto es un sistema de engranajes que nos permiten una gran relación de transmisión en un espacio reducido.

5.2. Engranaje planetario

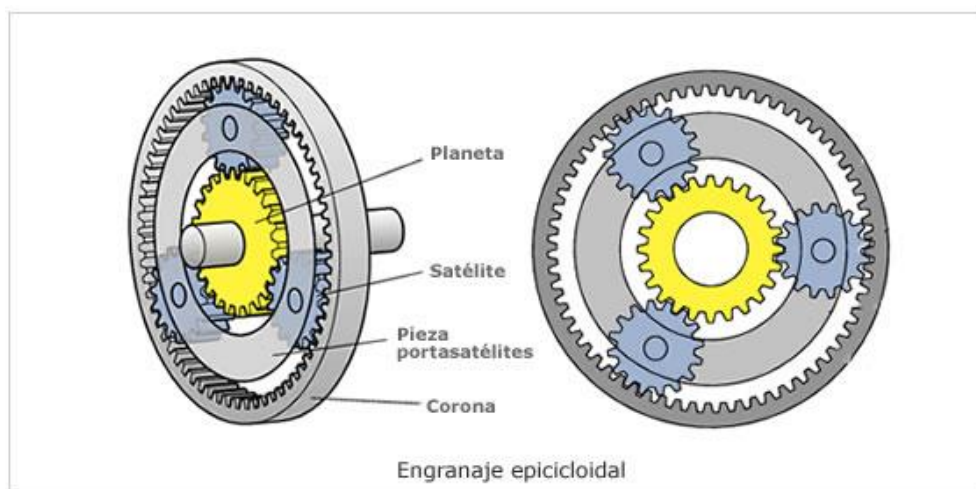


Figura 15: Planetario [jeroitim.blogspot.com]

En la Figura 15, se observa el mecanismo del engranaje a emplear. Para transmitir el movimiento del pedaleo hasta el planetario (el planetario estará situado en el eje del generador, de forma que la velocidad angular del planeta sea la misma que el BLDC), será necesario un plato en los pedales que junto a una cadena desplacen el movimiento (como se menciona en el apartado anterior). Por lo que se empleará este mecanismo para un primer aumento de velocidad con relación 1:2,1. Para ello el radio del plato deberá ser el doble del radio del porta-satélites.

Por tanto, se necesita que el planetario de una relación de transmisión de 9. Este planetario se puede encontrar en Amazon.es donde se encuentra con una relación de transformación de 1:9. Quedando en su total entre pedaleo y giro de generador de 1:18,75 aproximadamente.

En Amazon dicho engranaje se encuentra de la marca Amagogo, buscando engranaje planetario de 36T (el precio encontrado el día 25/06/2024 es de 29,89€). El fabricante no nos facilita un datasheet del mecanismo, pero adjunta la siguiente información:

- Planeta:
 - Diámetro = 47,5mm.
 - Nº de dientes = 18T.
- Engranajes satélite:
 - Diámetro = 47,5 mm.
 - Nº de dientes = 36T.
- Corona:
 - Diámetro = 124 mm.
- Plato (conectado a los pedales, independiente del planetario):
 - Diámetro = $(47,5 + 2 \cdot 23,75) \cdot 2,1 = 199,5$ mm.

En el Anexo C se encuentra un plano de cómo se conectaría este engranaje.

5.3. Arquitectura del prototipo

La bicicleta con la que se pretende realizar el prototipo es la siguiente:



Figura 16: Bicicleta estática para creación de prototipo

En dicha bicicleta se deberán realizar una serie de cambios:

- Retirar disco y el sistema de freno magnético.
- Retirar carcasas para mayor facilidad en el trabajo.
- Preparar espacio para colocar el generador en la zona del disco.
- Incorporar una caja o similar en la parte delante, tal y como se muestra en la figura. En ella se colocarán todos los componentes eléctricos y electrónicos. Convendría que la caja no estuviese completamente cerrada, para una mejor ventilación y evitar que se calienten los componentes.

Para poder colocar el generador, será necesario modificar la parte del disco, quitando partes metálicas y sustituyéndolas por un soporte en el que se pueda colocar el BLDC.

5.3.1 Resistencia de frenado

La resistencia se colocará en la barra central inferior de la bicicleta, ya que esta tiene las dimensiones adecuadas para su colocación. Siguiendo las indicaciones de su hoja de datos (Datasheet 11), sería adecuado colocar entre la bicicleta y la resistencia un material termoconductor (concretamente Thermal Film Q-Pad II). Esto ayuda a disipar el calor que genera la resistencia, cuando circulen los 400W previstos, haciendo que pase a la barra de la bicicleta la cual es suficientemente grande para disipar los 85°C que alcanza como máximo la resistencia.

Para prevenir que el ciclista o cualquier persona toque por error la resistencia, convendría instalarla en la parte inferior.

6. Componentes y presupuesto

6.1. Generador: Motor Transmotec -B86112-48

El generador se puede comprar directamente desde la web del proveedor [7]. En ella se encuentran varios precios en función de la cantidad de motores comprados.

Precio unitario (€)	Cantidad
584	1 pza
488,20	≥ 2 pzas
344,40	≥ 5 pzas
236	≥ 10 pzas

Tabla 1: Precios motor Transmotec en función de la cantidad pedida

Los datos de este se encuentran en el Datasheet 1 dentro del Anexo B. El elegido es el motor de 48V y 436W de potencia. Velocidad nominal de 2975 rpm.

6.2. Puente rectificador trifásico

En este componente se tienen 2 opciones, por un lado, se podría montar el puente comprando 6 diodos por bicicleta o por el contrario se podría comprar los puentes ya montados.

Precio unitario (€)	Cantidad
0,66	1 a 9 pza
0,577	≥ 10 pzas
0,459	≥ 100 pzas
0,239	≥ 5.000 pzas

Tabla 2: Precios de los diodos STPS10120C, en función de la cantidad pedida en Mouser

Dado el bajo precio de los diodos [8], sale rentable (especialmente para el prototipo) comprar diodos sueltos. Concretamente, los precios de la Tabla 2 corresponden a los diodos empleados en la simulación [9] de forma que las caídas de tensión corresponderán a las simuladas, así como su funcionamiento general. Los datos se encuentran en el Datasheet 2 dentro del Anexo B. En él se ha comprobado que la corriente I_{rms} admisible es superior a la que se espera. Para más información se puede consultar la web del distribuidor [8] o del fabricante [9].

6.3. Condensador 680 μ F (FPB)

El condensador se ha intentado que sea del mismo proveedor que los diodos, pero Mouser obliga a un pedido mínimo de 1000 condensadores de dicho tipo, lo cual implica un gasto innecesario. En RSComponent [10] hay un condensador de la capacitancia deseada con voltajes nominales de 25 a 35V lo cual se adapta a las necesidades del filtro. Dicho condensador es de la marca Vishay con número de referencia del fabricante MAL216051681E3 y código de RS 122-9120 para poder encontrarlo en la web.

Precio unitario (€)	Cantidad
3,828	5 a 20 pza
3,562	25 a 45 pzas
3,254	50 a 120 pzas

Tabla 3: Precios de un condensador de Vishay, en función de la cantidad pedida en RS

Al igual que el resto de los componentes, se encuentra información de este componente en la Datasheet 3 del Anexo B.

6.4. Convertidor reductor DC-DC

Las empresas ya mencionadas de componentes electrónicos nos ofrecen estos dispositivos ya diseñados como un solo componente. Sin embargo, los precios rondan entre los 70 a 2.000 euros por lo que se considera más interesante montar nuestro propio convertidor, especialmente para un primer prototipo de prueba.

6.4.1 MOSFET

En este caso habrá que tener en cuenta que se necesitan 2 por cada circuito. Para las potencias que se manejan en este circuito vendría bien emplear un IRLZ44N. Estos MOSFETs permiten trabajar con baja tensión en la puerta ya que proviene del microprocesador Arduino y suelen ser $\leq 5V$. Además, como se puede ver en los Datasheet 4 y Datasheet 5 (siendo ambos del mismo datasheet original), son capaces de soportar hasta 47 A de corriente y 55 V de tensión, por lo que tenemos margen para no quemarlos. Su resistencia es ínfima (similar a la de la simulación) por lo que no generará grandes pérdidas. Se pueden comprar en la página de Mouser [Mouser] con el nombre de IRLZ44NSTRLPBF (uno de los varios modelos que existen).

Precio unitario (€)	Cantidad
1,38	≥ 1 pza
1,13	≥ 10 pzas
0,847	≥ 100 pzas

Tabla 4: Precios MOSFET IRLZ44NSTRLPBF, en función de la cantidad pedida en Mouser

6.4.2 Bobina 330 μ H

Se usará una bobina de la marca KEMET cuya inductancia es de 311 μ H. Se puede encontrar en la web de las dos distribuidoras mencionadas [8] [10], buscando con su referencia SHBC24W-2R1A0311V. Datasheet 6.

Precio unitario (€)	Cantidad
13,75	≥ 1 pza
13,06	≥ 9 pzas
12,64	≥ 27 pzas

Tabla 5: Precios bobina de KEMET, en función de la cantidad pedida en Mouser

6.4.3 Condensador 600 μ F

Podemos usar el mismo condensador del filtro paso bajo del motor ya que 60 μ F de diferencia no afectan mucho. Además, aumentando la capacitancia conseguiremos que la carga de la batería sea con una tensión más lineal todavía.

6.5. Batería

Como se ha mencionado, se empleará una batería de gel por su robustez y seguridad ante fugas. Nos interesa que la capacidad sea suficientemente elevada (ya que la corriente máxima admisible va relacionada con la capacidad y nos interesa que sea elevada para obtener mayor potencia de carga). Asumiendo una potencia media generada por el ciclista de 150W, haciendo los cálculos (como se ha mencionado la corriente máxima admisible será un 25% de su capacidad) quedaría:

$$150W = 12V \cdot I_{adm_buscada} \rightarrow I_{adm_buscada} = 12,5A \quad (18)$$

$$\frac{12,5A}{0,25} = 50Ah \quad (19)$$

Sin embargo, se ha encontrado una batería de la marca Tensite de 100Ah con un precio no mucho mayor al de una de 50Ah, concretamente **181,08€**. Consiguiendo así una corriente máxima admisible de 25A (la cual limitaremos para mayor vida útil de la batería). Se puede encontrar la batería en la página del proveedor [11]. Datasheet 7 Datasheet 8 Datasheet 9.

6.6. Resistencia de frenado

Al haber elegido una resistencia de tan solo 1 Ω para disipar un máximo de 400W, será necesario una resistencia de potencia (Power resistor) las cuales tienen un precio relativamente elevado. Concretamente en RSComponent encontramos una resistencia de la marca Vishay que soporta 600W. Al permitir mayor potencia de la necesaria, se consigue que la resistencia no se caliente tanto. En la web del distribuidor [10] se encuentra buscando por el número del fabricante: LPS0600H1R00JB. Datasheet 10, Datasheet 11.

Precio unitario (€)	Cantidad
79,51	1 pza
77,92	≥ 2 pzas
74,74	≥ 5 pzas

Tabla 6: Precio de la resistencia de frenado por cantidad pedida en RS

Como ya se ha indicado en el apartado de diseño mecánico, la resistencia puede alcanzar temperaturas de 85°C a las que habría que añadir la temperatura ambiente. Es por ello por lo que es necesario disipar ese calor para que no disminuya la vida útil de la resistencia.

6.7. Microprocesador (Arduino)

Necesario para llevar a cabo todos los cálculos de ambos controles, así como la toma de medidas y registros de datos, además de controlar la interacción con el ciclista. Se pretende usar la placa Elegoo Mega de 2560 R3 (compatible con Arduino). Dicha placa viene con todas las salidas y entradas necesarias para nuestro proyecto y con un precio relativamente barato.

A pesar de no poder encontrarlo en las páginas ya utilizadas en este proyecto, se puede conseguir a través de varias empresas. Concretamente se ha visitado la web ElectroHobby donde se encuentra por un precio unitario de **14,99 €**. Para encontrar toda la documentación del procesador se puede visitar la web del fabricante [12], además de en los Datasheet 12 al Datasheet 20.

6.8. Pantalla

Para que el ciclista pueda elegir el par que quiere ejercer en su ejercicio (corriente de referencia), será necesario instalar una botonera o en su defecto una pantalla táctil. Se ha optado por incluir una pantalla ya que las hay por precio reducido y así se le podrá facilitar al ciclista información acerca del ejercicio que está realizando (velocidad, tiempo de ejercicio, etc.).

Se pretende usar una pantalla LCD de la marca 4D SYSTEMS (Nº fabricante: 4DLCD-24QA). Dicha pantalla se encuentra a un precio de **23,20 €** la unidad [8]. Datasheet 21 a Datasheet 28.

6.9. Elementos mecánicos

Como se menciona en el apartado 5, será necesario adquirir un engranaje planetario y una cadena. El resto se podrá fabricar en el laboratorio de la universidad.

El fabricante no facilita un datasheet del engranaje, adjunta los datos ya mencionados y un precio de **29,89 €**. Por su lado, la cadena, se puede encontrar de varios presupuestos y materiales. Una vez adquiridos el resto de los materiales habrá que calcular la distancia que esta debe tener. Su precio ronda los 50 euros.

6.10. Presupuesto del prototipo

COMPONENTE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)
BLDC	1	584	584
Diodo	7	0,66	4,62
Condensador	3 (Min 5)	3,828	19,14
MOSFET	4	1,38	5,52
Bobina	1	13,75	13,75
Batería	1	181,08	181,08
Microprocesador	1	14,99	14,99
Resistencia	1	79,51	79,51
Pantalla	1	23,20	23,20
Engranaje epicicloidal	1	29,89	29,89
Cadena	1	1	50
Total:			1.005,7

Tabla 7: Componentes y precio esperado para la fabricación de un prototipo

Se podrá utilizar una protoboard de la universidad para montar el circuito del prototipo. Una vez se quiera implementar el proyecto en el gimnasio de la universidad, sería interesante diseñar los circuitos en el programa CAD que utiliza la empresa que se encarga de montar placas con todos los componentes necesarios [13]. Este, además del precio de los



componentes, cobrará un extra por diseñar la placa con todo integrado lo cual es muy útil y visual a la hora de implantarlo de cara al público en el gimnasio.

Todos los precios mostrados en este apartado han sido elegidos de las páginas webs mencionadas, comprobando su vigencia el 25/06/2024.



7. Generación de energía

Con la batería elegida para el proyecto, asumiendo una potencia generada media por el ciclista de 150W (ritmo suave), toda la potencia generada será aprovechada por la batería. Sin embargo, en los casos en los que el ciclista quiera aumentar su potencia (llegando a picos de 400W), mucha potencia será desaprovechada y disipada por la resistencia de frenado. Para eliminar este problema, se debería rediseñar todo el proyecto, cambiando el convertidor por un Buck-Boost converter (convertidor reductor-elevador). Con esto se podría elegir una batería de mayor voltaje (48V, por ejemplo) aumentando así la potencia que puede consumir la misma. Otra opción sería aumentar la corriente, pero no es la opción más segura hacer pasar gran amperaje por cables cercanos al ciclista.

La potencia máxima actual que puede consumir la batería elegida se puede observar en la ecuación $P_{bat_m\acute{a}x} = U_{bat} \cdot I_{bat_m\acute{a}x} = 12V \cdot 25A = 300W$ (21). Sin embargo, una corriente de 25A y con tanto rango de variación puede ser perjudicial para la batería, por lo que se limitará a 15,5A. De esta forma queda una potencia de 168W.

Concretamente para una tensión en continua de 24V (aproximadamente 100 rpm del ciclista) y una corriente de referencia de 5A se generarían 120W. Cabe destacar que la tensión de la batería variará en función de su nivel de carga, pero siempre rondará los 12V por lo que se utilizará este valor para los cálculos.

$$P_{gen} = U_s \cdot I_s = P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} \quad (20)$$

$$P_{bat_m\acute{a}x} = U_{bat} \cdot I_{bat_m\acute{a}x} = 12V \cdot 25A = 300W \quad (21)$$

$$P_{bat_adm} = 12V \cdot 15.5A = 168W$$

De esta manera queda un rendimiento muy cercano al 100% ya que con un sistema de control mediante MOSFETs el rendimiento es muy cercano al máximo y solo tendríamos pérdidas en la resistencia de protección (la cual es muy pequeña) y en el diodo.

Como se ha mencionado, el problema se da cuando tenemos potencia generada muy elevada. Suponiendo que el ciclista es capaz de generar picos de hasta 400W, se tendría que disipar más del 50% de la potencia, haciendo el proyecto poco eficiente. Sin embargo, esta potencia no se prevé que se pueda mantener durante largos periodos de entrenamiento, siendo más viable un entrenamiento prologado de unos 150W aproximadamente.

Respecto al tiempo de carga, siendo la corriente admitida de 15,5 A, con una capacidad de 100Ah.

$$\frac{100Ah}{15,5A} \approx 6,45h \quad (22)$$

Esto sería para el caso de que la potencia generada sea igual o mayor a la máxima admitida. Sin embargo, podrá variar en función de los distintos valores que pueda tener de corriente de referencia y la velocidad del deportista.

El objetivo de la batería es cargar mayoritariamente dispositivos móviles, estos suelen tener una tensión media de carga de 5V y aproximadamente 3000mA.

$$100Ah \cdot 12V = 1200Wh \quad (23)$$

$$3000mA \cdot 5V = 15Wh \quad (24)$$

$$\frac{1200Wh}{15Wh} = 80 \text{ cargas de movil} \quad (25)$$

A pesar de que con una carga completa de la batería se podrían cargar 80 móviles, cabe destacar que será muy complicado que la batería se pueda llenar debido a su alta capacidad.

8. Objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU [14] consta de 17 objetivos a nivel global cuyo objetivo es tratar una amplia gama de desafíos sociales, económicos y ambientales a los cuales nos enfrentamos en la actualidad. Estos objetivos se establecieron el 25 de septiembre de 2015 durante la cumbre de las Naciones Unidas que tuvo lugar en Nueva York. Las 17 metas entran dentro de la Agenda 2030. Dichos objetivos son:



Figura 17: Objetivos de desarrollo sostenible

1. Fin de la pobreza.
2. Hambre cero.
3. Salud y bienestar.
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidades sostenibles.
12. Producción y consumo responsable.
13. Acción por el clima.
14. Vida submarina.
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas.
17. Alianzas para lograr los objetivos.

En el proyecto queremos contribuir con estos objetivos, es por ello que se toma parte en las siguientes metas:

- Objetivo 3, Salud y bienestar: El principal motor del circuito es el ejercicio humano a través del cual comienza la generación de electricidad. Por tanto, queremos motivar a los alumnos a utilizar estos dispositivos para cumplir tanto sus objetivos físicos como ayudar a generar energía para poder almacenarla y ser utilizada por ellos mismos. Fomentando así una vida saludable.
- Objetivo 4, Educación de calidad: El prototipo que se diseña en este proyecto puede ser fabricado y posteriormente estudiado por alumnos de la universidad en los laboratorios, aportando así un formato de educación interactivo.
- Objetivo 7, Energía asequible y no contaminante: Aunque el proyecto se basa en la modificación del gimnasio, esta tecnología se puede adaptar a cualquier hogar de una manera relativamente asequible. A pesar de que todavía no se tiene la capacidad para diseñar un circuito que con poco pedaleo sea capaz de darnos una gran cantidad de energía, sí que es una forma de complementar otras fuentes e incluso podría alimentar casas en aquellos países en los que el consumo eléctrico no sea tan elevado como el nuestro. La energía es producida por el cuerpo humano por lo que es completamente limpia y el único problema sería conectar una batería que pueda ser dañina para el ambiente, es por ello por lo que deberá ser elegida una batería que se ajuste a estos requisitos.
- Objetivo 12, Producción y consumo responsable: Uno de los objetivos es crear un circuito “cerrado” en el cual los clientes del gimnasio generen la propia electricidad que ellos puedan consumir con sus dispositivos, de una forma limpia.

9. Conclusión

Viendo los resultados del apartado 7, bien optimizado se podrán cargar varias baterías simultáneamente. Sabiendo esto, se podría crear un circuito inteligente que conectase diferentes baterías a las distintas bicicletas del gimnasio, sin conectar más de una bicicleta a la misma batería ya que con una sola es suficiente para cargar.

Por lo tanto, el proyecto es viable, pero habría que ver su interés económico. Viendo el precio de la luz en España [15] y cogiendo el precio más caro del kWh en el día de hoy (0,15267€/kWh), costaría 1€ cargar más de 400 móviles.

$$0,15267 \cdot \frac{10^{-3}\text{€}}{\text{Wh}} \cdot 15\text{Wh} = 2,29 \cdot 10^{-3}\text{€} \quad (26)$$

Esto indica que el motivo económico no es suficiente para llevar a cabo el proyecto, más bien lo contrario. Se necesitarían muchos años con los dispositivos funcionando para amortizar la inversión y es probable que fallen antes de alcanzarlo. Se podría intentar hacer cambios en el proyecto para economizarlo, pero seguiría siendo insuficiente.

Sin embargo, hay otros motivos que pueden hacer interesantes llevar a cabo este proyecto:

Por un lado, es una motivación para hacer cambios y fomentar proyectos de energía limpia. A pesar de que el proyecto en sí no tenga un gran impacto, este puede inculcar en los alumnos y profesores de la universidad la idea de que es necesario actuar frente a la crisis climática y energética, dando así pie a ideas similares a estar que puedan tener un mayor impacto.

Además, de cara al gimnasio es un servicio añadido para los deportistas ya que tendrían un acceso de carga para sus dispositivos en la máquina en la que realizan deporte.

Por último y siendo esta una universidad con facultades de ingeniería, lo expuesto en este trabajo puede tener gran interés académico. Se tocan materias relacionadas con las 3 ramas que se estudian (eléctrica, electrónica y en menor medida mecánica). Esto puede ser útil para mostrar a los alumnos un ejemplo físico de aplicaciones prácticas de asignaturas como máquinas eléctricas o electrónica de potencia.

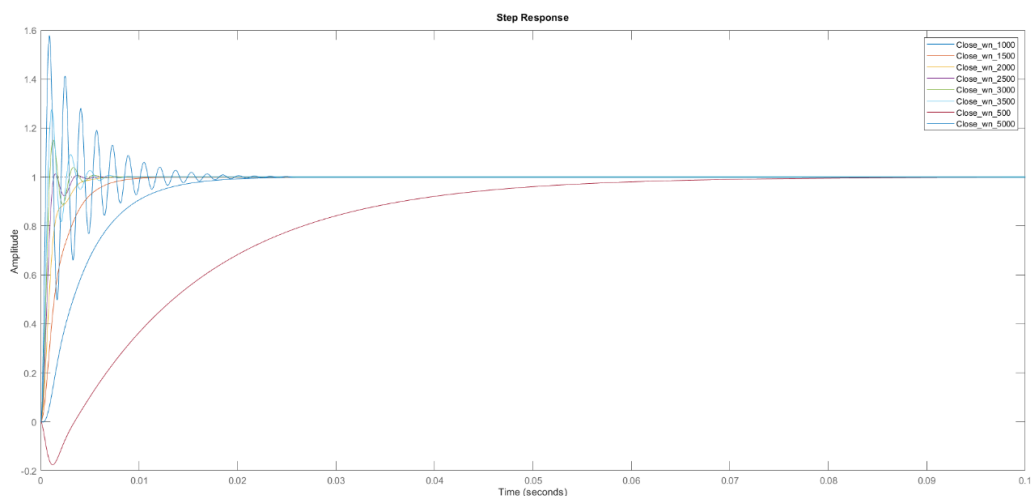
Se concluye entonces que sería interesante para la universidad llevar a cabo la construcción de al menos un prototipo y estudiar la posibilidad de implantarlo en el resto del gimnasio habiendo visto su funcionamiento.

Bibliografía

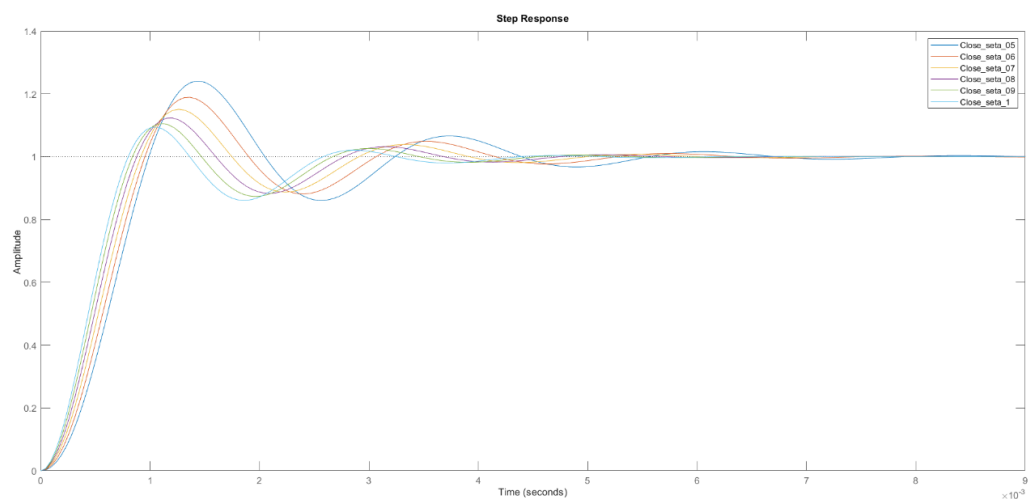
- [1] Europea, U. (Último acceso: 24 de 06 de 2024). *comission europa*.
https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_es
- [2] UE. (Último acceso: 24 de 06 de 2024). *Consilium Europa*.
<https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/eu-measures-to-cut-down-energy-bills/>
- [3] D. W. Hart, *Power Electronics*, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 2010.
- [4] MASTERVOLT. (Último acceso: 22 de 05 de 2024). <https://www.mastervolt.es/carga-de-las-bateras/>
- [5] sport.es. (Último acceso: 21 de 02 de 2024). *sport.es*. <https://www.sport.es/bicio/la-cadencia-de-pedaleo-en-el-ciclismo-claves-y-factores-que-influyen/#:~:text=Un%20ciclista%20principiante%20normalmente%20acostumbra,los%2090%20y%20110%20RPM.>
- [6] García, P. (Último acceso: 14 de 02 de 2024). *deporteysaludfisica.com*.
<https://www.deporteysaludfisica.com/a-cuantas-revoluciones-por-minuto-entrenar/>
- [7] Transmotec. (Último acceso: 16 de 04 de 2024).
<https://transmotec.es/product/B86112-48/>
- [8] Mouser. (Último acceso: 16 de 04 de 2024). *Distribuidor*. <https://www.mouser.es/>
- [9] STMicroelectronics. (Último acceso: 16 de 04 de 2024). *Diodos*. Obtenido de
<https://estore.st.com/en/stps10120ct-cpn.html>
- [10] RSComponent. (Último acceso: 16 de 04 de 2024). <https://es.rs-online.com/web/>
- [11] HDBattery. (Último acceso: 22 de 05 de 2024).
https://www.hdbattery.com/p11808879_bateria-de-gel-tensite-dc12-100-12v-100ah-900a.html#leermas
- [12] MICRCHIP. (Último acceso: 16 de 04 de 2024). <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega2560#document-table>
- [13] KiCad. (Último acceso: 16 de 04 de 2024). <https://www.kicad.org>
- [14] ONU. (Último acceso: 21 de 02 de 2024). *Rumbo al 2030*. <https://www.undp.org/es>
- [15] TarifaLuzHoy. (Último acceso: 18 de 04 de 2024). <https://tarifaluzhora.es/>

Anexo A: Gráficas y tablas

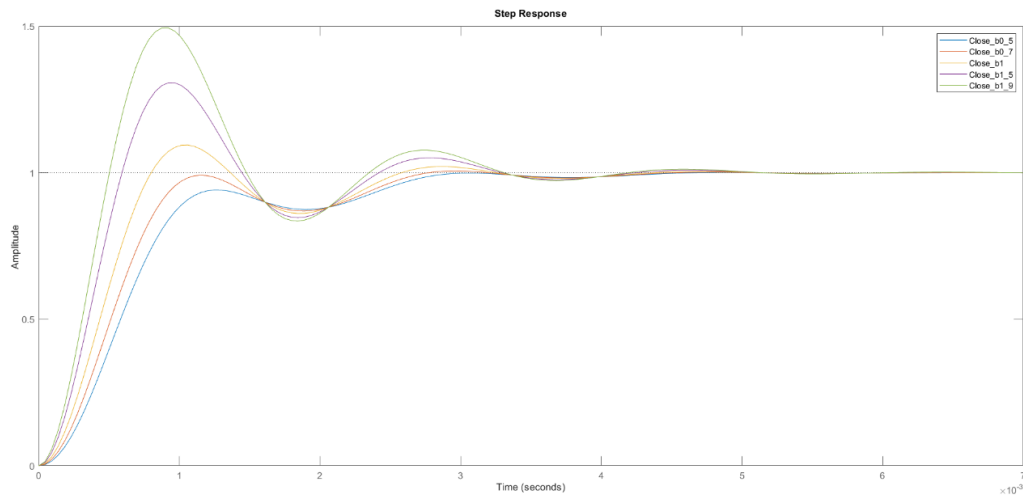
- Gráficas diseño del lazo cerrado:



Gráfica 13: Lazo cerrado con diferentes w_n



Gráfica 14: Lazo cerrado con seta entre 0,5 y 1



Gráfica 15: Efecto de la ponderación b

- Tabla de datos del BLDC a partir de la simulación:

Ciclista	RPM	Resistencia	Tensión (RMS) tri.	Tension fase-fase	Corriente (RMS) tri.	Tensión mon. MEAN	Corriente mon. MEAN	Potencia tri.	Potencia mon.
140	3000	3 Ohm	16,53	28,63	8,934	34,38	11,46	393,8599463	393,9948
126	2700	3 Ohm	14,94	25,88	8,085	31,03	10,34	322,1466633	320,8502
112	2400	3 Ohm	13,33	23,09	7,221	27,65	9,216	256,7145653	254,8224
98	2100	3 Ohm	11,71	20,28	6,34	24,21	8,071	198,0018138	195,39891
84	1800	3 Ohm	10,08	17,46	5,442	20,73	6,909	146,2992451	143,22357
70	1500	3 Ohm	8,461	14,65	4,527	17,19	5,73	102,1539596	98,4987
56	1200	3 Ohm	6,793	11,77	3,591	13,6	4,532	65,05789922	61,6352
42	900	3 Ohm	5,113	8,86	2,634	9,948	3,316	35,91820121	32,987568
28	600	3 Ohm	3,423	5,93	1,664	6,267	2,089	15,19089062	13,091763
14	300	3 Ohm	1,722	2,98	0,7006	2,647	0,8825	3,217557344	2,3359775
0	0	3 Ohm	0	0,00	0	0	0	0	0

Tabla 8: Datos simulación motor con resistencia de 3Ω

Ciclista	RPM	Corriente	Tensión (RMS) tri.	Tension fase-fase	Corriente (RMS) tri.	Tensión mon. MEAN	Corriente mon. MEAN	Potencia tri.	Potencia mon.
140	3000	10 (A)	16,77	29,04	7,827	34,96	10	349,60	349,6
126	2700	10 (A)	15,03	26,04	7,823	31,17	10	313,32	311,7
112	2400	10 (A)	13,30	23,03	7,818	27,37	10	276,93	273,7
98	2100	10 (A)	11,57	20,04	7,812	23,57	10	240,79	235,7
84	1800	10 (A)	9,83	17,03	7,804	19,77	10	204,41	197,7
70	1500	10 (A)	8,10	14,03	7,794	15,97	10	168,19	159,7
56	1200	10 (A)	6,37	11,03	7,779	12,16	10	131,97	121,6
42	900	10 (A)	4,64	8,033	7,755	8,355	10	95,81	83,6
28	600	10 (A)	2,91	5,044	7,724	4,543	10	59,92	45,4
14	300	10 (A)	1,17	2,032	7,692	0,6796	10	24,04	6,8
0	0	10 (A)	0,00	0	0	0	0	0,00	0,0

Tabla 9: Datos simulación motor con fuente de 10A

Ciclista	RPM	Corriente	Tensión (RMS) tri.	Tension fase-fase	Corriente (RMS) tri.	Tensión mon. MEAN	Corriente mon. MEAN	Potencia tri.	Potencia mon.
140	3000	7,5 (A)	17,05	29,53	5,912	36,02	7,5	268,52	270,2
126	2700	7,5 (A)	15,30	26,5	5,909	32,15	7,5	240,84	241,1
112	2400	7,5 (A)	13,56	23,48	5,906	28,28	7,5	213,29	212,1
98	2100	7,5 (A)	11,81	20,45	5,902	24,41	7,5	185,64	183,1
84	1800	7,5 (A)	10,06	17,42	5,896	20,54	7,5	157,97	154,1
70	1500	7,5 (A)	8,31	14,4	5,889	16,67	7,5	130,43	125,0
56	1200	7,5 (A)	6,56	11,37	5,879	12,79	7,5	102,81	95,9
42	900	7,5 (A)	4,82	8,342	5,864	8,916	7,5	75,24	66,9
28	600	7,5 (A)	3,07	5,32	5,849	5,031	7,5	47,86	37,7
14	300	7,5 (A)	1,32	2,286	5,85	1,117	7,5	20,57	8,4
0	0	7,5 (A)	0,00	0	0	0	0	0,00	0,0

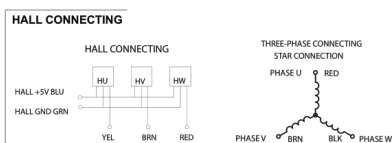
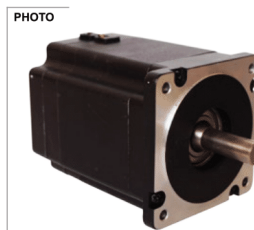
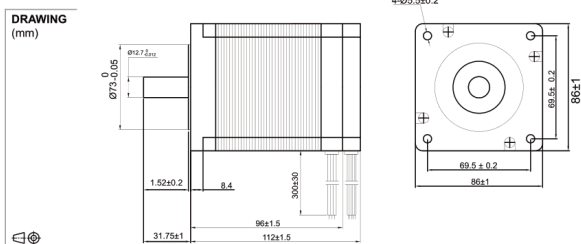
Tabla 10: Datos simulación motor con fuente de 7,5A

Ciclista	RPM	Corriente	Tensión (RMS) tri.	Tension fase-fase	Corriente (RMS) tri.	Tensión mon. MEAN	Corriente mon. MEAN	Potencia tri.	Potencia mon.
140	3000	5 (A)	17,31	29,99	3,974	37,13	5	183,31	185,7
126	2700	5 (A)	15,56	26,95	3,972	33,19	5	164,64	166,0
112	2400	5 (A)	13,80	23,9	3,97	29,25	5	145,94	146,3
98	2100	5 (A)	12,04	20,85	3,968	25,3	5	127,25	126,5
84	1800	5 (A)	10,28	17,8	3,964	21,36	5	108,52	106,8
70	1500	5 (A)	8,52	14,75	3,96	17,41	5	89,84	87,1
56	1200	5 (A)	6,75	11,7	3,954	13,47	5	71,15	67,4
42	900	5 (A)	4,99	8,648	3,945	9,517	5	52,47	47,6
28	600	5 (A)	3,23	5,599	3,94	5,559	5	33,93	27,8
14	300	5 (A)	1,47	2,547	3,938	1,595	5	15,43	8,0
0	0	5 (A)	0,00	0	0	0	0	0,00	0,0

Tabla 11: Datos simulación motor con fuente de 5A

Anexo B: Datasheets

B86112 / Ø 86mm



MODEL NO. DESIGNATION

MODEL - VOLTAGE

Example: B86112-12

MOTOR DATA							
	Units	B86112-24	B86112-48		Units	B86112	
Nominal voltage	V	24	48	Nominal voltage	V	24	48
Nominal power	W	393	436	Ambient temperature	°C	-15...+40	
No load speed	rpm	3870	3600	Max. permissible winding temperature	°C	140	120
No load current	mA	2400	1200	Max. permissible speed	rpm	5000	
Nominal speed	rpm	3126	2975	Axial play at axial load < 3,5 N	mm	0,1	
Nominal torque	Nm	1.2	1.4	Axial play at axial load > 3,5 N	mm	0,6	
Nominal current	A	23	11.8	Radial play	mm@g	0,02	
Stall torque	Nm	6.2	8	Max. axial load (dynamic)	N	60	
Starting current	A	108	62	Max. force for press fits (static)	N	560	
Max. efficiency	%	74.1	77.6	Max. force for press fits (static, shaft)	N	2000	
Terminal resistance phase to phase	Ω	0.04	0.16	Max. radial loading, 10 mm from flange	N	220	
Terminal inductance phase to phase	mH	0.096	0.5	Number of pole pairs		4	
Torque constant	Nm / A	0.0586	0.13	Number of phases		3	
Speed constant	rpm / V	160	75	Weight	g	3150	
Speed / torque gradient	rpm / Nm	624	450				
Mechanical time constant	ms	10.6	7.7				
Rotor inertia	gcm ²	1600	1600				

TRANSMOTEC
www.transmotec.com

Page 24

© Copyright Transmotec

EU: +46 8 792 35 30
US: +1-339-234-9200
info@transmotec.com

Datasheet 1: BLDC Transmotec 48V 436W



1 Characteristics

Table 1. Absolute ratings (limiting values per diode at 25 °C, unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{RRM}	Repetitive peak reverse voltage	120	V
$I_{F(RMS)}$	Forward rms current	30	A
$I_{F(AV)}$	Average forward current, $\delta = 0.5$, square wave	$T_c = 160\text{ °C}$ Per diode	5
		$T_c = 155\text{ °C}$ Per device	10
I_{FSM}	Surge non repetitive forward current	$t_p = 10\text{ ms}$ sinusoidal	120
P_{ARM}	Repetitive peak avalanche power	$t_p = 10\text{ }\mu\text{s}$, $T_j = 125\text{ °C}$	215
T_{stg}	Storage temperature range	-65 to +175	°C
T_j	Maximum operating junction temperature ⁽¹⁾	+175	°C

1. $(dP_{tot}/dT_j) < (1/R_{th(j-a)})$ condition to avoid thermal runaway for a diode on its own heatsink.

Table 2. Thermal resistance parameters

Symbol	Parameter	Max. value	Unit
$R_{th(j-c)}$	Junction to case	Per diode	3.8
		Total	2.3
$R_{th(c)}$	Coupling	0.7	°C/W

When the diodes 1 and 2 are used simultaneously: $\Delta T_j (\text{diode1}) = P_{(\text{diode1})} \times R_{th(j-c)} (\text{per diode}) + P_{(\text{diode2})} \times R_{th(c)}$

For more information, please refer to the following application note :

- AN5088 : Rectifiers thermal management, handling and mounting recommendations

Table 3. Static electrical characteristics (per diode)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_R^{(1)}$	Reverse leakage current	$T_j = 25\text{ °C}$	-	-	6	μA
		$T_j = 125\text{ °C}$	-	1	3	mA
$V_F^{(2)}$	Forward voltage drop	$T_j = 25\text{ °C}$	-	-	0.85	V
		$T_j = 125\text{ °C}$	-	0.64	0.70	
		$T_j = 25\text{ °C}$	-	-	0.96	
		$T_j = 125\text{ °C}$	-	0.73	0.80	

1. Pulse test: $t_p = 5\text{ ms}$, $\delta < 2\%$

2. Pulse test: $t_p = 380\text{ }\mu\text{s}$, $\delta < 2\%$

To evaluate the conduction losses, use the following equation: $P = 0.60 \times I_{F(AV)} + 0.02 \times I_F^2 (RMS)$

For more information, please refer to the following application notes related to the power losses :

- AN604: Calculation of conduction losses in a power rectifier
- AN4021: Calculation of reverse losses on a power diode



www.vishay.com

160 RLA

Vishay BCcomponents

Table 2

ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION										
U _R (V)	C _R 100 kHz (μF)	NOMINAL CASE SIZE Ø D x L (mm)	I _R 100 kHz 150 °C (mA)	I _{L2} 2 min (μA)	tan δ 100 Hz	Z 100 kHz +20 °C (Ω)	Z 100 kHz -40 °C (Ω)	ORDERING CODE MAL2160.....		
								BULK PACKAGING		TAPED
								FORM CA	FORM CB	FORM TFA
16	220	10 x 16	300	38	0.14	0.075	0.450	55221E3	65221E3	35221E3
	330	10 x 20	400	56	0.14	0.065	0.390	55331E3	65331E3	35331E3
	470	12.5 x 20	600	78	0.14	0.048	0.288	55471E3	65471E3	35471E3
	680	12.5 x 25	700	112	0.14	0.040	0.240	55681E3	65681E3	35681E3
	1000	16 x 25	800	163	0.16	0.029	0.174	55102E3	65102E3	35102E3
	1500	18 x 20	750	243	0.16	0.035	0.210	55152E3	65152E3	35152E3
	2200	18 x 25	1200	355	0.18	0.028	0.168	55222E3	65222E3	35222E3
	2700	18 x 31	1600	435	0.18	0.025	0.150	55272E3	65272E3	35272E3
25	3300	18 x 35	2000	531	0.20	0.023	0.132	55332E3	65332E3	-
	100	10 x 12	250	28	0.12	0.120	0.750	56101E3	66101E3	36101E3
	220	12.5 x 20	600	58	0.12	0.048	0.288	56221E3	66221E3	36221E3
	330	12.5 x 25	700	86	0.12	0.040	0.240	56331E3	66331E3	36331E3
	470	16 x 25	800	121	0.12	0.029	0.174	56471E3	66471E3	36471E3
	1000	16 x 31	1000	253	0.12	0.027	0.162	56102E3	66102E3	36102E3
35	1500	18 x 31	1600	378	0.14	0.025	0.150	56152E3	66152E3	36152E3
	47	10 x 12	250	19	0.10	0.120	0.750	50479E3	60479E3	30479E3
	100	10 x 16	400	38	0.10	0.075	0.450	50101E3	60101E3	30101E3
	220	12.5 x 20	600	80	0.10	0.048	0.288	50221E3	60221E3	30221E3
	330	12.5 x 25	700	119	0.10	0.040	0.240	50331E3	60331E3	30331E3
	470	18 x 20	750	168	0.10	0.035	0.210	50471E3	60471E3	30471E3
50	680	16 x 31	1000	241	0.10	0.027	0.162	50681E3	60681E3	30681E3
	1000	18 x 35	1200	353	0.10	0.024	0.144	50102E3	60102E3	-
	33	10 x 12	160	20	0.10	0.380	2.280	51339E3	61339E3	31339E3
	47	10 x 12	180	27	0.10	0.360	2.160	51479E3	61479E3	31479E3
	100	10 x 16	270	53	0.10	0.260	1.560	51101E3	61101E3	31101E3
	220	10 x 20	360	113	0.10	0.170	1.020	51221E3	61221E3	31221E3
	330	12.5 x 20	400	168	0.10	0.115	0.690	51331E3	61331E3	31331E3
	470	12.5 x 25	600	238	0.10	0.095	0.570	51471E3	61471E3	31471E3
	680	16 x 25	700	343	0.10	0.069	0.414	51681E3	61681E3	31681E3
	1000	18 x 31	1000	503	0.10	0.062	0.372	51102E3	61102E3	31102E3

ADDITIONAL ELECTRICAL DATA		
PARAMETER	CONDITIONS	VALUE
Voltage		
Surge voltage		$U_s \leq 1.15 \times U_R$
Reverse voltage		$U_{rev} \leq 0.5 \text{ V}$
Current		
Leakage current	After 2 min at U_R	$I_{L2} \leq 0.01 C_R \times U_R + 3 \mu\text{A}$
Inductance		
Equivalent series inductance (ESL)	Case Ø D = 10 mm	Typ. 16 nH
	Case Ø D ≥ 12.5 mm	Typ. 18 nH
Resistance		
Equivalent series resistance (ESR)	Calculated from tan δ _{max} and C _R (see Table 2)	$ESR = \tan \delta / 2 \pi f C_R$

Revision: 26-Apr-16

3

Document Number: 28420

For technical questions, contact: aluminumcaps1@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Datasheet 3: Condensador Vishay 680μF

International IR Rectifier

- Logic-Level Gate Drive
- Advanced Process Technology
- Surface Mount (IRLZ44NS)
- Low-profile through-hole (IRLZ44NL)
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free

Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The D²Pak is a surface mount power package capable of accommodating die sizes up to HEX-4. It provides the highest power capability and the lowest possible on-resistance in any existing surface mount package. The D²Pak is suitable for high current applications because of its low internal connection resistance and can dissipate up to 2.0W in a typical surface mount application.

The through-hole version (IRLZ44NL) is available for low-profile applications.

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V} \text{①}$	47	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V} \text{①}$	33	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①②	160	
$P_D @ T_A = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	3.8	W
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	110	W
	Linear Derating Factor	0.71	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 16	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②③	210	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ④	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ④	11	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ⑤	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	

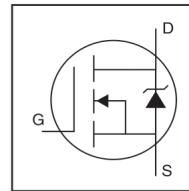
Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.4	°C/W
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient (PCB Mounted, steady-state)**	—	40	

PD - 95156

IRLZ44NS/LPbF

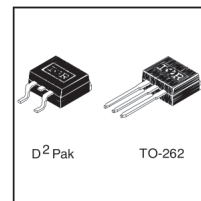
HEXFET® Power MOSFET



$$V_{DS} = 55\text{V}$$

$$R_{DS(on)} = 0.022\Omega$$

$$I_D = 47\text{A}$$



D² Pak

TO-262

4/21/04

Datasheet 4: MOSFET IRLZ44N p1

IRLZ44NS/LPbF

International
IR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	—	0.070	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to 25°C , $I_D = 1mA$ ③
$R_{DS(on)}$	—	—	0.022	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ④
	—	—	0.025		$V_{GS} = 5.0V, I_D = 25A$ ④
	—	—	0.035		$V_{GS} = 4.0V, I_D = 21A$ ④
$V_{GS(th)}$	1.0	—	2.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	21	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ⑤
I_{DSS}	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
	—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	—	—	100	nA	$V_{GS} = 16V$
	—	—	-100		$V_{GS} = -16V$
Q_g	—	—	48	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	—	—	8.6		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	—	—	25		$V_{GS} = 5.0V$, See Fig. 6 and 13 ④ ⑤
$t_{d(on)}$	—	11	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	—	84	—		$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	—	26	—		$R_G = 3.4\Omega, V_{GS} = 5.0V$
t_f	—	15	—		$R_D = 1.1\Omega$, See Fig. 10 ④ ⑤
L_S	—	7.5	—	nH	Between lead, and center of die contact
C_{iss}	—	1700	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	—	400	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	—	150	—		$f = 1.0MHz$, See Fig. 5⑤

Source-Drain Ratings and Characteristics

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	—	—	47	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	—	—	160		
V_{SD}	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	—	80	120	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$
Q_{rr}	—	210	320	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④ ⑤
t_{on}	—	—	—		Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② $V_{DD} = 25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 470\mu H$
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 25A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 25A$, $di/dt \leq 270A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ Uses IRLZ44N data and test conditions

** When mounted on 1" square PCB (FR-4 or G-10 Material).
For recommended footprint and soldering techniques refer to application note #AN-994.

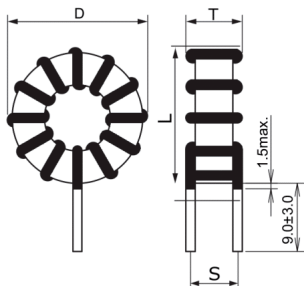
Datasheet 5: MOSFET IRLZ44N p2



SHBC24W-2R1A0311V

Aliases (UALS4W2R1A0311)

KEMET, SHBC, AC Line Filters, Normal Mode, 0.311 mH, 20%



Click [here](#) for the 3D model.

Dimensions

D	57.6mm MAX
L	57.6mm MAX
T	30.5mm MAX
LL	9mm +/-3mm
S	24mm NOM
Wire Size	2.1mm

Packaging Specifications

Packaging	Tray
Packaging Quantity	45
Typical Component Weight	224 g

General Information

Series	SHBC
Style	Through-Hole
Features	Low Core Loss, High Frequency Drive
RoHS	Yes
Miscellaneous	55 (K) Temperature Rise Max.
Core	Fe-Si-Al

Specifications

Inductance	311 uH
Inductance Tolerance	20%
Current	15 A
Temperature Range	-40/+125°C
DC Resistance	20.1mOhms

Statements of suitability for certain applications are based on our knowledge of typical operating conditions for such applications, but are not intended to constitute - and we specifically disclaim - any warranty concerning suitability for a specific customer application or use. This information is intended for use only by customers who have the requisite experience and capability to determine the correct products for their application. Any technical advice inferred from this information or otherwise provided by us with reference to the use of our products is given gratis, and we assume no obligation or liability for the advice given or results obtained.

Generated 6/18/2024 - e9456370-752b-444a-a2b5-252ee83b61d2

© 2006 - 2024 KEMET

Datasheet 6: Bobina Kemet

ESTACIONARIA GEL
Regulada
con Válvula

Upower
Unlimited power

Serie UP

FTCG250-12

TERMINAL FRONTAL DE CARBONO



Características Principales

- Batería de gel regulada por válvula.
- Aplicaciones estacionarias y de reserva de energía.
- Definición de la vida útil del diseño EUROBAT: Vida muy larga +12 años.
- Rendimiento de vida de flotación extremadamente largo.
- Resistencia superior a los ciclos.
- Diseño compacto con alta densidad de energía.
- Integración en el bastidor ETSI.
- Bajo coste de instalación, producto sin mantenimiento.
- Sellado para un funcionamiento a prueba de fugas.
- Se entrega listo para su uso.
- Carga no peligrosa para el transporte terrestre, marítimo y aéreo.
- Producto totalmente reciclable.

Certificación



- ISO 9001
- ISO 14001
- OHSAS 18001
- AQAP 2110

Especificaciones Eléctricas

Voltaje Nominal (V)	12
Número de Celdas	6
Capacidad Nominal (Ah)	200 (tasa C10 a 1.80 Vpc a 20°C) 250 (tasa C100 a 1.80 Vpc a 20°C)
Resistencia Interna	3.9 mOhm (IEC 60 896-21/22)
Corriente de Cortocircuito (A)	3 250 (IEC 60 896-21/22)
Voltaje de Carga de Flotación (V)	2.27 por celda (Vpc) a 20°C

Características del Diseño

Vida Útil del Diseño Flotante a 20°C	15 años
Placas	Marca plana pegada
Material Activo	Plomo virgen de muy alta pureza
Aleación de Rejilla	Aleación de plomo-calcio-estaño
Electrolito	Ácido sulfúrico, grado analítico
Separador	Esteras de fibra de vidrio absorbente (AGM)
Temperatura de Funcionamiento	-20°C a 60°C 15°C a 25°C (recomendado)
Válvula de Ventilación	Goma, unidireccional, autosellante - Presión de apertura: 1.7 PSI - Presión de resellado: 1.5 PSI

Normas y Recomendaciones Aplicables

IEC 60896 - 21/22; EN 50272 - 2; IEC 61427 - 1/2; IEC 61056 - 1; EEE 1184; IEEE 1187; IEEE 1188

01

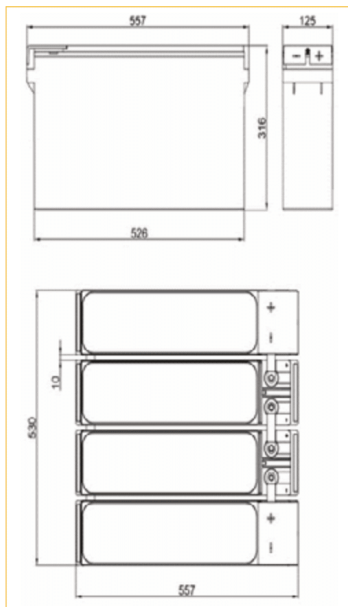
Datasheet 7: Batería 100Ah 1/3

ESTACIONARIA GEL Regulada con Válvula

UP-FTCG250-12

Upower
Unlimited power

Planos



Características del Diseño

Eficiencia de Recombinación Interna de Gases	Más del 99%
Apagallamas	Disponible
Sistema Central de Desgasificación	Disponible
Temperaturas de Almacenamiento	-20°C a 40°C
Autodescarga	Menos del 2.0% por mes a 20°C
Almacenamiento sin Recarga	Hasta 6 meses a 20°C
Vida Útil	Hasta 1 año
Material del Contenedor/Tapa	ABS FR resistente a los golpes; clase de inflamabilidad UL94 V0
Posición del Terminal	Frontal
Sellado del Terminal	Mecánico + Epoxi Doble Sellado
Tipo de Terminal	Latón; hembra; rosca M8
Par de Apriete del Terminal	7 Nm
Tapa del Terminal de Transporte	Disponible
Asas de Transporte	Disponible (2)
Conectores y Pernos	Suministrado de serie

Características Físicas

	SI Units	Unidades de EE.UU.
Longitud	557 mm	21.9 pulgadas
Anchura	125 mm	4.9 pulgadas
Altura	316 mm	12.4 pulgadas
Peso	60 kg	132.3 libras

Características de Rendimiento

Factor de Corrección de Temperatura de Capacidad a Descarga de Corriente Constante										
Tiempo de Descarga	-10°C	0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
De 5 a 59 minutos	0.70	0.80	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.13	1.15	1.16
De 1 a 20 horas	0.82	0.88	0.94	0.97	1.00	1.03	1.05	1.07	1.08	1.10

Rendimiento de Descarga a Descarga de Corriente Constante (Ah) para Batería 12HVR190C a 20°C												
Uf, Vpc	15min	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h	120h
1.60 V	68.0	98.0	119.3	138.9	152.6	162.5	170.2	176.1	187.9	195.7	209.4	236.8
1.65 V	68.0	97.0	118.8	138.3	152.0	161.7	169.5	175.4	187.0	194.8	208.2	235.6
1.70 V	68.0	97.0	118.2	137.6	151.2	160.9	168.5	174.4	186.0	193.8	207.3	234.5
1.75 V	67.0	96.0	117.0	136.2	149.7	159.2	167.0	172.7	184.3	191.9	205.2	232.2
1.80 V	67.0	95.0	115.9	134.9	148.2	157.7	165.3	171.0	182.4	190.0	203.3	229.9
1.85 V	65.0	93.0	113.1	131.5	144.4	153.9	161.1	166.8	177.8	185.3	198.2	224.2

02

ESTACIONARIA GEL Regulada con Válvula

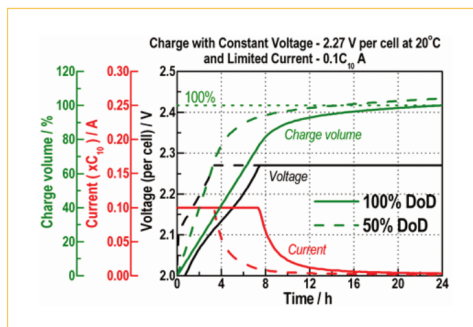
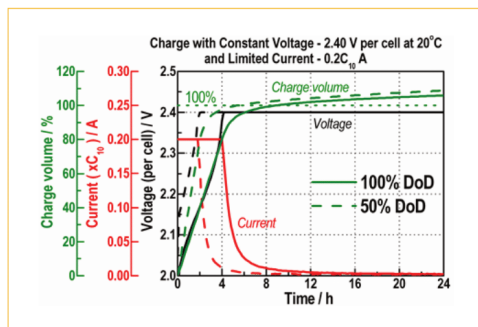
UP-FTCG250-12

Upower
Unlimited power

Rendimiento de Descarga a Descarga de Corriente Constante (A) para Batería 12HVR190C a 20°C												
Uf, Vpc	15min	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h	120h
1.60 V	274.0	196.0	119.3	69.4	50.9	40.6	34.0	29.4	23.5	19.6	10.47	1.97
1.65 V	273.0	195.0	118.8	69.2	50.7	40.4	33.9	29.2	23.4	19.5	10.41	1.96
1.70 V	271.0	194.0	118.2	68.8	50.4	40.2	33.7	29.1	23.3	19.4	10.36	1.95
1.75 V	269.0	192.0	117.0	68.1	49.9	39.8	33.4	28.8	23.0	19.2	10.26	1.93
1.80 V	266.0	190.0	115.9	67.5	49.4	39.4	33.1	28.5	22.8	19.0	10.17	1.92
1.85 V	259.0	185.0	113.1	65.7	48.1	38.5	32.2	27.8	22.2	18.5	9.91	1.87

Rendimiento de Descarga a Descarga de Potencia Constante W (por Celda) para Batería 12HVR190C a 20°C												
Uf, Vpc	15min	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h	120h
1.60 V	547.0	391.0	238.6	138.9	101.7	81.2	68.1	58.7	47.0	39.1	20.94	4.10
1.65 V	546.0	390.0	237.5	138.3	101.3	80.9	67.8	58.4	46.7	39.0	20.82	4.07
1.70 V	543.0	388.0	236.4	137.6	100.3	80.5	67.4	58.1	46.5	38.8	20.73	4.07
1.75 V	538.0	384.0	234.1	136.2	99.3	79.6	66.8	57.6	45.9	38.4	20.52	4.03
1.80 V	532.0	380.0	231.8	134.9	98.8	78.9	66.1	57.0	45.6	38.0	20.33	3.99
1.85 V	518.0	371.0	226.1	131.5	96.3	77.0	64.4	55.6	44.5	37.1	19.82	3.88

Condiciones de Carga de la Batería a 20°C de Voltaje Constante y Corriente Limitada (IU)			
Límite de Corriente de Carga	Voltaje de Carga Flotante	Voltaje de Carga de Ecuilibración	Voltaje de Carga de Refuerzo
0.1 - 0.25C10A Recomendada: 0.20C10A	2.27V por celda a 20°C; Corrección de temperatura: -3mV/cell/°C	2.32V por celda a 20°C Recomendado: cada 3 meses para 24h durante la operación de flotación prolongada	2.40V por celda a 20°C; Corrección de temperatura: -4mV/cell/°C
Aplicación de flotación: 0.20C10A/2.27V por celda a 20°C		Aplicaciones cíclicas: 0.20C10A/2.40V por celda a 20°C Entrada de Ah de recarga de al menos el 105% de Ah de descarga anterior	



* Upower se reserva el derecho de cambiar o revisar sin previo aviso cualquier información o detalle dado en esta publicación.

03

Datasheet 9: Batería 100Ah 3/3



www.vishay.com

LPS 600

Vishay Sfernice

Power Resistor for Mounting onto a Heatsink Thick Film Technology



FEATURES

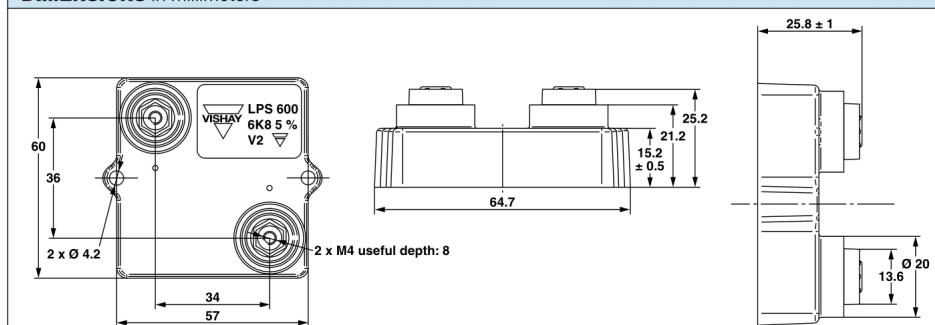
- Compliant with requirement #26 of NF-EN45545-2
- High power 600 W at 85 °C bottom case temperature
- Wide resistance range: 0.3 Ω to 900 k Ω E24 series
- Non inductive
- Easy mounting
- Low thermal radiation of the case
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



DESIGN SUPPORT TOOLS AVAILABLE



DIMENSIONS in millimeters



Note

- Tolerances unless stated: ± 0.2 mm

STANDARD ELECTRICAL SPECIFICATIONS

MODEL	RESISTANCE RANGE Ω	RATED POWER $P_{85}^{\circ C}$ W	LIMITING ELEMENT VOLTAGE U_L V	TOLERANCE $\pm \%$	TEMPERATURE COEFFICIENT $\pm$ ppm/ $^{\circ}C$	CRITICAL RESISTANCE (Ω)
LPS 600	0.3 to 900K	600	5K	1, 2, 5, 10	150, 300, 500	41.66K

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Mechanical Protection	Insulated case UL 94 V-0
Resistive Element	Thick film
Substrate	Alumina
End Connections	Screws M4
Tightening Torque Connections	2 Nm
Tightening Torque Heatsink	2 Nm
Maximum Torque	2.5 Nm
Weight	83 g $\pm 10 \%$

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Temperature Range	- 55 $^{\circ}C$ to 155 $^{\circ}C$
Climatic Category	55/155/56

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Power Rating and Thermal Resistance	600 W at + 85 $^{\circ}C$ bottom case temperature $R_{TH(j-c)}$: 0.112 $^{\circ}C/W$
Temperature Coefficient -55 $^{\circ}C/155^{\circ}C$ IEC 60115-1 Standard	$R \leq 1 \Omega$: ± 500 ppm/ $^{\circ}C$ $1 \Omega < R \leq 10 \Omega$: ± 300 ppm/ $^{\circ}C$ $10 \Omega < R$: ± 150 ppm/ $^{\circ}C$
Dielectric Strength IEC 60115-1, 1 min, 10 mA max.	7 kV _{RMS} or 12 kV _{RMS}
Lightning test 1.2/50 μs IEC 61000-4-5	Until 12 kV
Insulation Resistance	$\geq 10^4$ M Ω
Inductance	≤ 0.1 μH
Partial Discharge (for LPS 600 D only)	≤ 100 pC/7 kV ≤ 10 pC/5 kV Other cases: Consult us

Revision: 05-Jun-2019

1

Document Number: 50053

For technical questions, contact: sferfixedresistors@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Datasheet 10: Resistencia de potencia 1/2



www.vishay.com

LPS 600

Vishay Sfernice

PERFORMANCE		
TESTS	CONDITIONS	REQUIREMENTS
Momentary Overload	IEC 60115-1 $2 \times P_r / 10 \text{ s}$ $U_{\max} \leq U_L = 5000 \text{ V}$	$\pm (0.25 \% + 0.05 \Omega)$
Rapid Temperature Change	IEC 60115-1/IEC 60068-2-14 Test Na 50 cycles -55 °C to +155 °C	$\pm (0.5 \% + 0.05 \Omega)$
Load Life	IEC 60115-1 1000 h (90/30) P_r at 85 °C	$\pm (0.5 \% + 0.05 \Omega)$
Humidity (Steady State)	IEC 60115-1 56 days RH 95 % / 40 °C	$\pm (0.5 \% + 0.05 \Omega)$
Vibration	MIL STD 202 method 204 cond. D (10 g; 5/500 Hz)	$\pm (0.25 \% + 0.05 \Omega)$
Climatic Sequence	IEC 60115-1 (55 / 155 / 56)	$\pm (1 \% + 0.05 \Omega)$

RECOMMENDATIONS FOR MOUNTING ONTO A HEATSINK

- Surfaces in contact must be carefully cleaned.
- The heatsink must have an acceptable flatness: From 0.05 mm to 0.1 mm/100 mm.
- Roughness of the heatsink must be around 6.3 µm. In order to improve thermal conductivity, surfaces in contact (alumina, heatsink) should be coated with a silicone grease (type Bluesil Past 340 from BlueStar Silicones) or a thermal film (type Q Pad II) easier and faster to install than the grease.
- The fastening of the resistor to the heatsink is under pressure control of two screws tightened at 2 Nm for full power availability.

Tightening Torque on Heatsink	LPS 600
	2 Nm

- The following accessories are supplied with each product:
 - 2 screws CHC M4 x 25 class 8.8 and 2 M4 contact lock washers for heatsink mounting
 - 2 screws TH M4 x 6/6 and 2 M4 contact lock washers for connections

CHOICE OF THE HEATSINK

The user must choose the heatsink according to the working conditions of the component (power, room temperature). Maximum working temperature must not exceed 155 °C. The dissipated power is simply calculated by the following ratio:

$$P = \frac{\Delta T}{R_{TH(j-c)} + R_{TH(c-h)} + R_{TH(h-a)}}$$

- P: Expressed in W
- ΔT : Difference between maximum working temperature and room temperature
- $R_{TH(j-c)}$: Thermal resistance value measured between resistive layer and outer side of the resistor.
It is the thermal resistance of the component: (see specifications environmental paragraph).
- $R_{TH(c-h)}$: Thermal resistance value measured between outer side of the resistor and upper side of the heatsink.
This is the thermal resistance of the interface (grease, thermal pad), and the quality of the fastening device.
- $R_{TH(h-a)}$: Thermal resistance of the heatsink.

Example:

$R_{TH(c-a)}$ for LPS 600 power dissipation 180 W at + 50 °C room temperature.

$$\Delta T \leq 155 \text{ °C} - 50 \text{ °C} = 105 \text{ °C}$$

$$R_{TH(j-c)} + R_{TH(c-h)} + R_{TH(h-a)} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{105}{180} = 0.58 \text{ °C/W}$$

$$R_{TH(j-c)} = 0.112 \text{ °C/W}$$

$$R_{TH(c-h)} + R_{TH(h-a)} = 0.58 \text{ °C/W} - 0.112 \text{ °C/W} = 0.468 \text{ °C/W}$$

Revision: 05-Jun-2019

2

Document Number: 50053

For technical questions, contact: sferfixedresistors@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

Datasheet 11: Resistencia de potencia 2/2



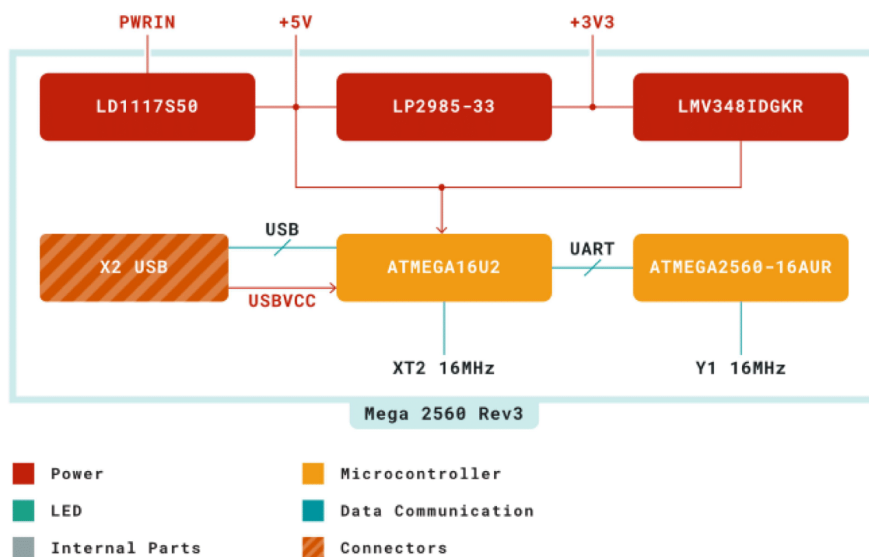
2 Ratings

2.1 Recommended Operating Conditions

Symbol	Description	Min	Typ	Max	Unit
V_{IN}	Input voltage from VIN pad / DC Jack	7	7.0	12	V
V_{USB}	Input voltage from USB connector	4.8	5.0	5.5	V
T_{OP}	Operating Temperature	-40	25	85	°C

3 Functional Overview

3.1 Block Diagram



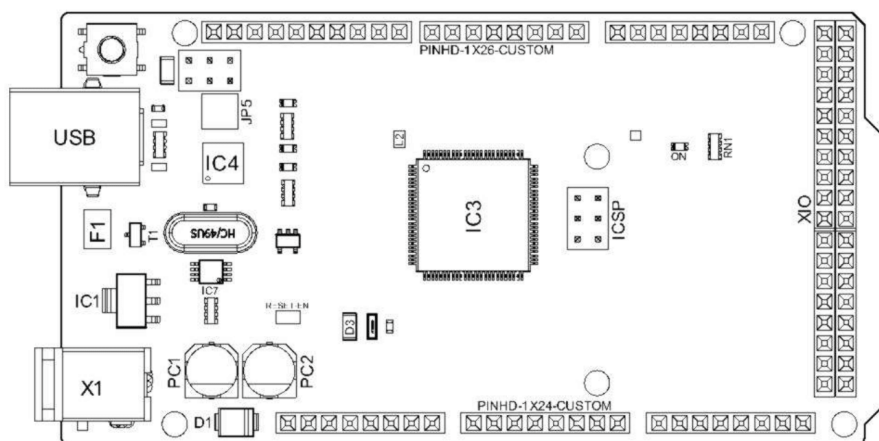
Arduino Mega 2560 Rev3 Block Diagram



Arduino® Mega 2560 Rev3

3.2 Board Topology

Front View



Arduino Mega 2560 Rev3 Top View

Ref.	Description	Ref.	Description
USB	USB B Connector	F1	Chip Capacitor
IC1	5V Linear Regulator	X1	Power Jack Connector
JP5	Plated Holes	IC4	ATmega16U2 chip
PC1	Electrolytic Aluminum Capacitor	PC2	Electrolytic Aluminum Capacitor
D1	General Purpose Rectifier	D3	General Purpose Diode
L1	Fixed Inductor	IC3	ATmega2560 chip
ICSP	Connector Header	ON	Green LED
RN1	Resistor Array	XIO	Connector

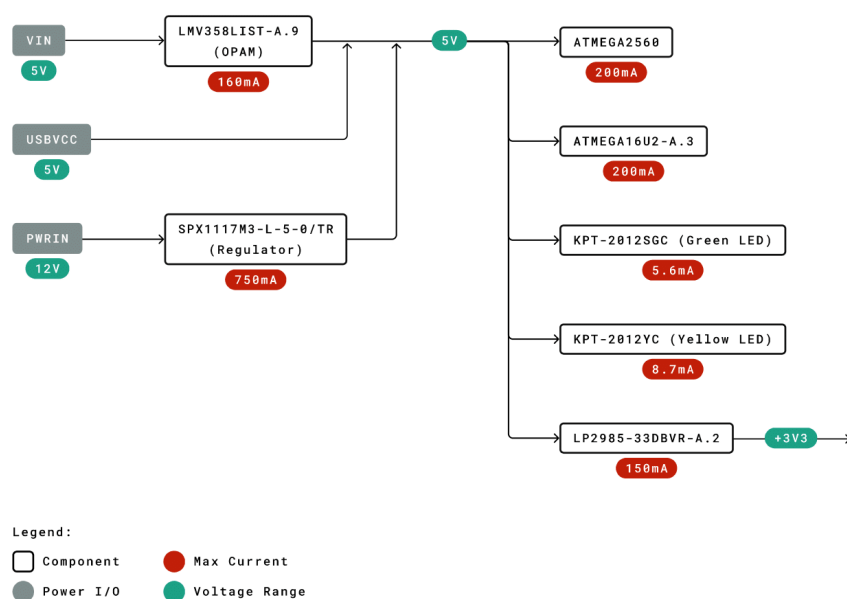


Arduino® Mega 2560 Rev3

3.3 Processor

Primary processor of Mega 2560 Rev3 board is ATmega2560 chip which operates at a frequency of 16 MHz. It accommodates a large number of input and output lines which gives the provision of interfacing many external devices. At the same time the operations and processing is not slowed due to its significantly larger RAM than the other processors. The board also features a USB serial processor ATmega16U2 which acts an interface between the USB input signals and the main processor. This increases the flexibility of interfacing and connecting peripherals to the Mega 2560 Rev3 board.

3.4 Power Tree

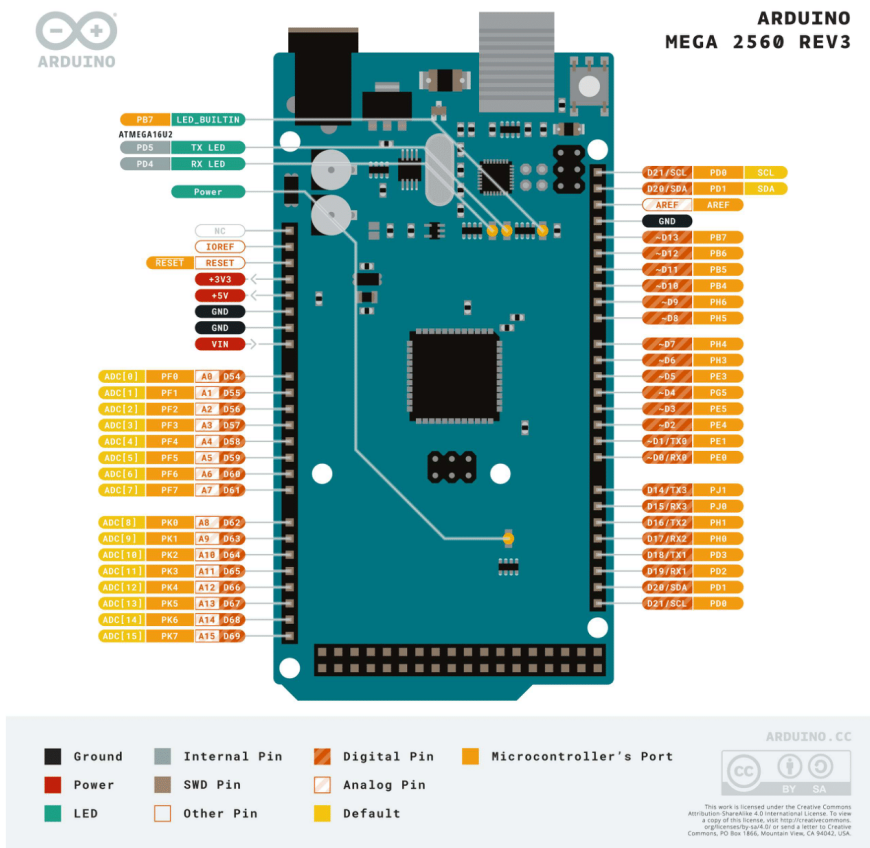


Power Tree



Arduino® Mega 2560 Rev3

5 Connector Pinouts



Arduino Mega 2560 Rev3 Pinout



5.1 Analog

Pin	Function	Type	Description
1	NC	NC	Not Connected
2	IOREF	IOREF	Reference for digital logic V - connected to 5V
3	Reset	Reset	Reset
4	+3V3	Power	+3V3 Power Rail
5	+5V	Power	+5V Power Rail
6	GND	Power	Ground
7	GND	Power	Ground
8	VIN	Power	Voltage Input
9	A0	Analog	Analog input 0 /GPIO
10	A1	Analog	Analog input 1 /GPIO
11	A2	Analog	Analog input 2 /GPIO
12	A3	Analog	Analog input 3 /GPIO
13	A4	Analog	Analog input 4 /GPIO
14	A5	Analog	Analog input 5 /GPIO
15	A6	Analog	Analog input 6 /GPIO
16	A7	Analog	Analog input 7 /GPIO
17	A8	Analog	Analog input 8 /GPIO
18	A9	Analog	Analog input 9 /GPIO
19	A10	Analog	Analog input 10 /GPIO
20	A11	Analog	Analog input 11 /GPIO
21	A12	Analog	Analog input 12 /GPIO
22	A13	Analog	Analog input 13 /GPIO
23	A14	Analog	Analog input 14 /GPIO
24	A15	Analog	Analog input 15 /GPIO

5.2 Digital

Pin	Function	Type	Description
1	D21/SCL	Digital Input/I2C	Digital input 21/I2C Dataline
2	D20/SDA	Digital Input/I2C	Digital input 20/I2C Dataline
3	AREF	Digital	Analog Reference Voltage
4	GND	Power	Ground
5	D13	Digital/GPIO	Digital input 13/GPIO
6	D12	Digital/GPIO	Digital input 12/GPIO
7	D11	Digital/GPIO	Digital input 11/GPIO
8	D10	Digital/GPIO	Digital input 10/GPIO
9	D9	Digital/GPIO	Digital input 9/GPIO
10	D8	Digital/GPIO	Digital input 8/GPIO
11	D7	Digital/GPIO	Digital input 7/GPIO
12	D6	Digital/GPIO	Digital input 6/GPIO
13	D5	Digital/GPIO	Digital input 5/GPIO
14	D4	Digital/GPIO	Digital input 4/GPIO



Arduino Mega 2560 Rev3 Pinout



5.3 ATMEGA16U2 JP5

Pin	Function	Type	Description
1	PB4	Internal	Serial Wire Debug
2	PB6	Internal	Serial Wire Debug
3	PB5	Internal	Serial Wire Debug
4	PB7	Internal	Serial Wire Debug

5.4 ATMEGA16U2 ICSP1

Pin	Function	Type	Description
1	CIPO	Internal	Controller In Peripheral Out
2	+5V	Internal	Power Supply of 5V
3	SCK	Internal	Serial Clock
4	COPI	Internal	Controller Out Peripheral In
5	RESET	Internal	Reset
6	GND	Internal	Ground

5.5 Digital Pins D22 - D53 LHS

Pin	Function	Type	Description
1	+5V	Power	Power Supply of 5V
2	D22	Digital	Digital input 22/GPIO
3	D24	Digital	Digital input 24/GPIO
4	D26	Digital	Digital input 26/GPIO
5	D28	Digital	Digital input 28/GPIO
6	D30	Digital	Digital input 30/GPIO
7	D32	Digital	Digital input 32/GPIO
8	D34	Digital	Digital input 34/GPIO
9	D36	Digital	Digital input 36/GPIO
10	D38	Digital	Digital input 38/GPIO
11	D40	Digital	Digital input 40/GPIO
12	D42	Digital	Digital input 42/GPIO
13	D44	Digital	Digital input 44/GPIO
14	D46	Digital	Digital input 46/GPIO
15	D48	Digital	Digital input 48/GPIO
16	D50	Digital	Digital input 50/GPIO
17	D52	Digital	Digital input 52/GPIO
18	GND	Power	Ground

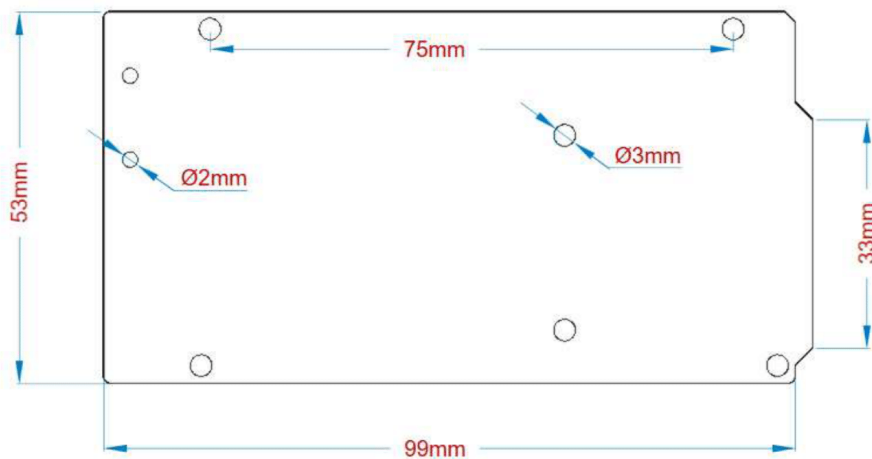


5.6 Digital Pins D22 - D53 RHS

Pin	Function	Type	Description
1	+5V	Power	Power Supply of 5V
2	D23	Digital	Digital input 23/GPIO
3	D25	Digital	Digital input 25/GPIO
4	D27	Digital	Digital input 27/GPIO
5	D29	Digital	Digital input 29/GPIO
6	D31	Digital	Digital input 31/GPIO
7	D33	Digital	Digital input 33/GPIO
8	D35	Digital	Digital input 35/GPIO
9	D37	Digital	Digital input 37/GPIO
10	D39	Digital	Digital input 39/GPIO
11	D41	Digital	Digital input 41/GPIO
12	D43	Digital	Digital input 43/GPIO
13	D45	Digital	Digital input 45/GPIO
14	D47	Digital	Digital input 47/GPIO
15	D49	Digital	Digital input 49/GPIO
16	D51	Digital	Digital input 51/GPIO
17	D53	Digital	Digital input 53/GPIO
18	GND	Power	Ground

6 Mechanical Information

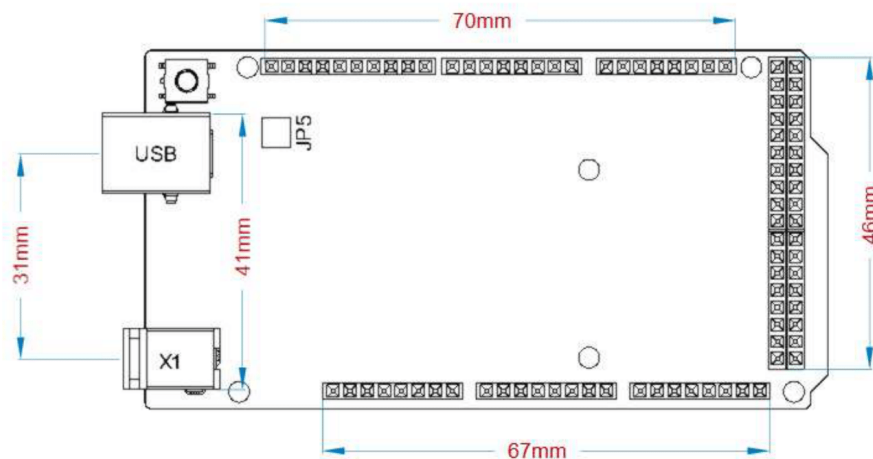
6.1 Board Outline





Arduino Mega 2560 Rev3 Outline

6.2 Board Mount Holes



Arduino Mega 2560 Rev3 Mount Holes

Certifications

7 Declaration of Conformity CE DoC (EU)

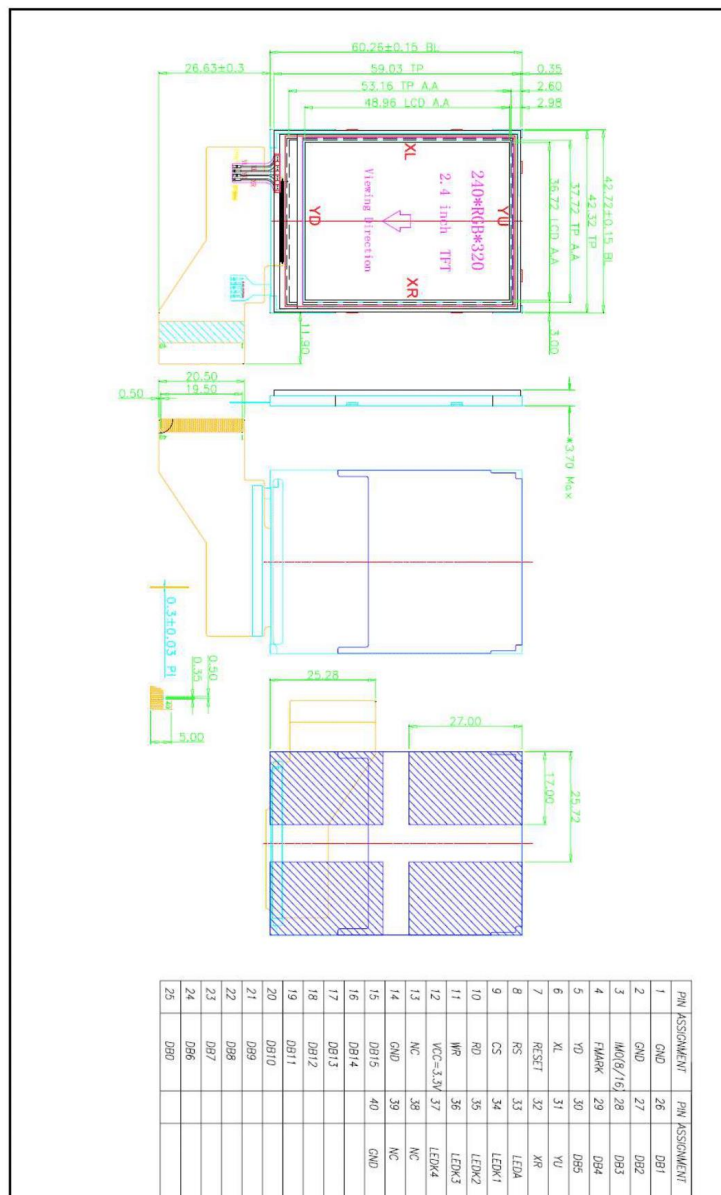
We declare under our sole responsibility that the products above are in conformity with the essential requirements of the following EU Directives and therefore qualify for free movement within markets comprising the European Union (EU) and European Economic Area (EEA).

1. SPECIFICATIONS

1.1 General Specifications

S.No.	Items	Specifications
1	Screen size (inch)	2.4" Diagonal
2	LCD Type	TFT, Positive, TRANSMISSIVE
3	Colors	65K Color
4	Display Resolution	240 x RGB x 320
5	Module Outline (mm)	42.72 x 60.26 x 3.7 (W x H x T)
6	Active Area (mm)	36.72 x 48.96 (W x H)
7	Touch Panel Dimension	42.3 x 59.03 x 1.2
8	Viewing Direction	6:00 O' Clock
9	Pixel Arrangement	RGB Vertical Stripe
10	Interface	8080, 8/16 bit CPU Interface
11	Assembly Type	Connector type FPC
12	Driver IC	ILI9341
13	Backlight	4 x White LED
14	Pixel Arrangement	RGB Vertical Stripe

1.2 Mechanical Specifications



1.3 Pin Descriptions

Pin	Symbol	I/O	Function
1	GND	Power	Ground
2	GND	Power	Ground
3	IMO(8/16)	Control	Interface Mode 0: for 16bit Mode 1: for 8bit Mode
4	FMARK	Control	Output a frame head pulse signal
5	Y- (Y_D)	INPUT	Touch Panel Y
6	X+ (X_L)	INPUT	Touch Panel X
7	RESET	INPUT	A Reset Signal
8	RS	INPUT	A Register select signal
9	CS	INPUT	A Chip select signal
10	RD	INPUT	Read signal
11	WR	INPUT	Write signal
12	VCC	Power	3.3V: Analog Power Supply
13	NC	-	Not Connected
14	GND	Power	Ground
15~22	DB15~ DB08	I/O	Parallel interface data bus
23	DB7	I/O	Parallel interface data bus
24	DB6	I/O	Parallel interface data bus
25	DB0	I/O	Parallel interface data bus
26	DB1	I/O	Parallel interface data bus
27	DB2	I/O	Parallel interface data bus
28	DB3	I/O	Parallel interface data bus
29	DB4	I/O	Parallel interface data bus
30	DB5	I/O	Parallel interface data bus
31	Y+ (Y_U)	INPUT	Touch Panel Y
32	X- (X_R)	INPUT	Touch Panel X :
33	LEDA		LED Anode
34	LEDK1		LED cathode
35	LEDK2		LED cathode
36	LEDK3		LED cathode
37	LEDK4		LED cathode
38	NC	-	Not Connected
39	NC	-	Not Connected
40	GND		Power Ground

2. ELECTRICAL SPECIFICATIONS

2.1 Absolute Maximum Ratings

Items	Symbol	Condition	Min.	Max.	Unit
Power supply Voltage	V_{CI}	$T_a = +25^{\circ}\text{C}$	-0.3	+4.6	V
	$V_{GH} - V_{SS}$		-0.3	+18.5	V
	$V_{SS} - V_{GL}$		-0.3	+18.5	V
Input Voltage	V_{in}		-0.3	$V_{CI} + 0.3$	V
Operating Temperature	T_{OP}	-	-20	+70	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	T_{ST}	-	-30	+80	$^{\circ}\text{C}$
Storage Humidity	H_D	-	20	90	%RH

Cautions:

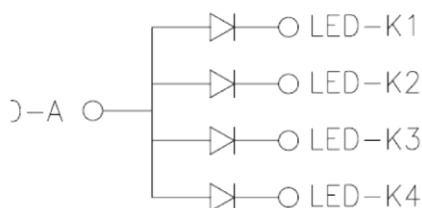
Any stresses exceeding the absolute Maximum Ratings may cause substantial damage to the device.

2.2 DC Characteristics

Items	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Power supply voltage	V_{CI}	$T_a = +25^{\circ}\text{C}$	2.6	2.8	3.3	V
Input High Voltage	V_{IH}		$0.8V_{CI}$	-	V_{CI}	V
Input Low Voltage	V_{IL}		-0.3	-	$0.2V_{CI}$	V
Output High Voltage	V_{OH}		$0.8V_{CI}$	-	-	V
Output Low Voltage	V_{OL}		-	-	$0.2V_{CI}$	V

2.3 LED Backlight Maximum Ratings

Items	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	Comments
Forward Current	I_F	$T_a = +25^{\circ}\text{C}$	-	-	60	mA	
Forward Voltage	V_F		-	-	3.5	V	
Power Dissipation	P_D		-	-	210	mW	



2.4 LED Backlight Optical Characteristics

Items	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	V _F	I _F = 60mA	2.8	3.2	3.5	V
Average Brightness (without LCD)	I _V	V _F = 3.2V 4 x White LEDs	3500	-	-	cd/m ²
Chromaticity Coordinates	X	Ta = +25°C	0.26	-	0.31	
	Y		0.26	-	0.31	
Color	White					

3. OPTICAL CHARACTERISTICS

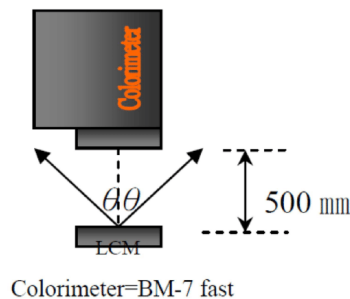
Optical characteristics are determined after the unit has been 'ON' and stable for approximately 30min in a dark environment at 25°C. The values specified are at an approximate distance 50cm from the TFT-LCD surface at a viewing angle of $\theta = \phi = 0^\circ$. $V_{CC} = 2.8V$

Item	Symbol		Condition	Min	Typ	Max	Unit	Remark
Contrast ratio	Cr			-	250	-	-	Note 3
Response time	Tr+Tf		Ta = +25°C Θx = Θy = 0°	-	30	-	ms	Note 2
Color Filter chromaticity	Red	x	Ta = +25°C Θx = Θy = 0°	0.606	0.626	0.646	-	Note 1
		y		0.314	0.334	0.354	-	
	Green	x		0.257	0.277	0.297	-	
		y		0.529	0.549	0.569	-	
	Blue	x		0.122	0.142	0.162	-	
		y		0.102	0.122	0.142	-	
	White	x		0.283	0.303	0.323	-	
		y		0.305	0.325	0.345	-	
Average Brightness Pattern = white display (main)		Iv	If = 60mA	-	150	-	cd/m ²	Note 1
Uniformity		ΔB	Ic = 60mA	80	-	-	%	

Fig 1: Optical Characteristic Measurement and Method

Note1:

1. $\Delta B = B(\min) / B(\max) \times 100\%$
2. Measurement Condition for Optical Characteristics:
 - a. Environment: $25^\circ C \pm 5^\circ C$ / $60 \pm 20\% R.H.$, no wind, dark room below 10 Lux with a typical lamp.
 - b. Current and typical operating frequency.
 - c. Measurement Distance: $500 \pm 50mm$, ($\theta = 0^\circ$).
 - d. Equipment: TOPCON BM-7 fast, (field 1°), after 10 minutes operation.
 - e. The uncertainty of the C.I.E coordinate measurement ± 0.01 , Average Brightness $\pm 4\%$



Note2: Response time:

The output signals of photo detector are measured when the input signals are changed from "black" to "white" (falling time) and from "white" to "black" (rising time), respectively. The response time is defined as the time interval between the 10% and 90% of Amplitudes. Refer to figure as below:

4. TOUCH CHARACTERISTICS

Touch Parameters					
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Operating Voltage		-	5	-	V
Linearity		± 1.5			%
Terminal Resistance X	X film side	200	300	800	Ohm
Terminal Resistance Y	Y film side	300	600	900	Ohm
Operating Temperature		-10	-	60	°C
Storage Temperature		-20	-	70	°C
Transmittance		80	-	-	%
Life Time – Tapping Durability		1	-	-	Million
Life Time – Pen Durability	Stylus Pen or Finger Press	1	-	-	Million
Response Time				10	ms

- **ITO Film:** Single Layer/Clear Hard Coating
- **Tail Type:** FPC by Golden Plated
- **Connection:** FPC Connector
- **RoHS Compliant**

5. QUALITY TESTING

Result Evaluation Criterion:

- $T = 25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, Indoors, Not exposed to sunlight, Humidity = $60 \pm 5\%$ RH.
- Operating State: Samples subject to the test shall be in operating conditions.

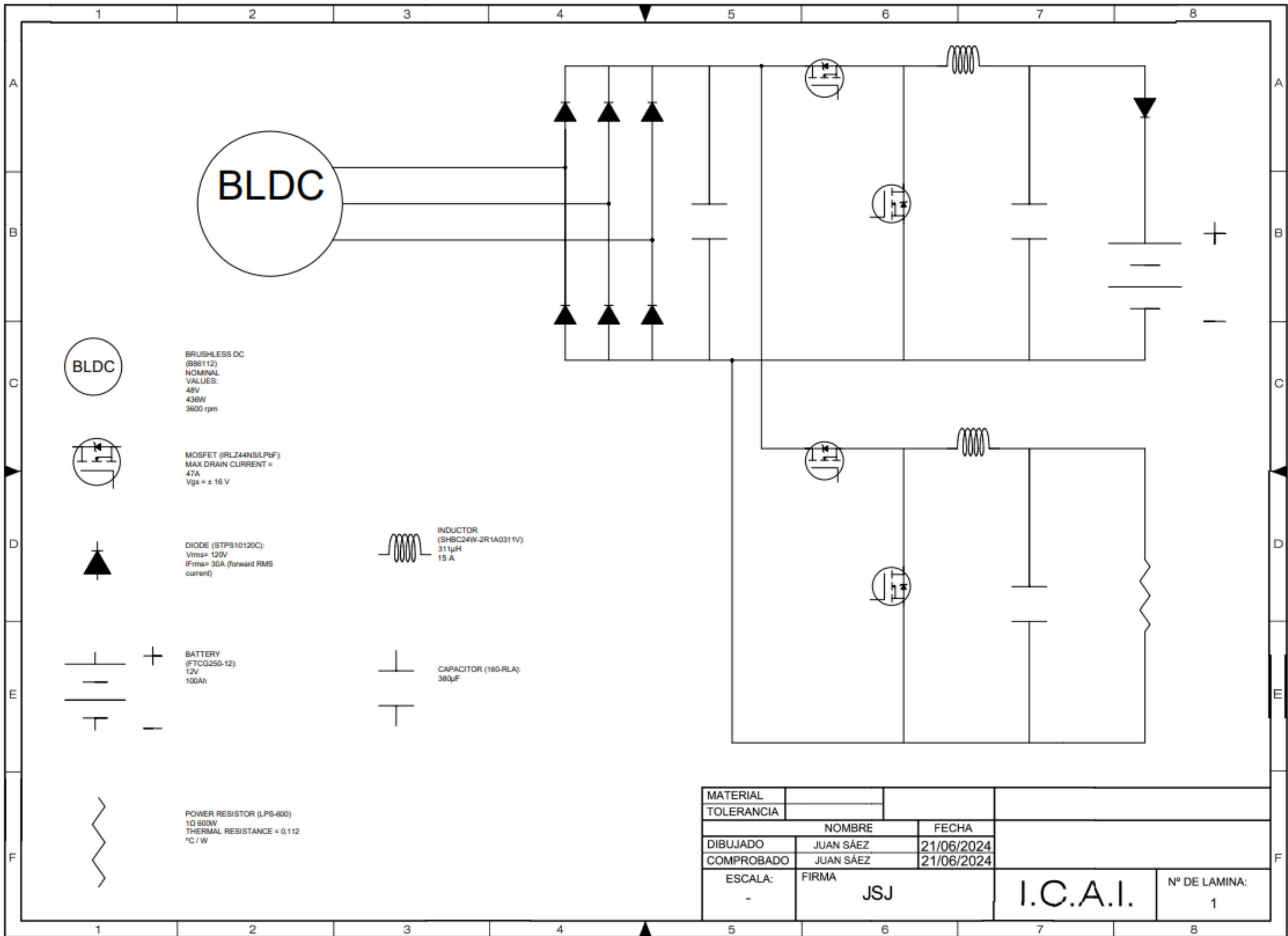
5.1 Reliability Tests

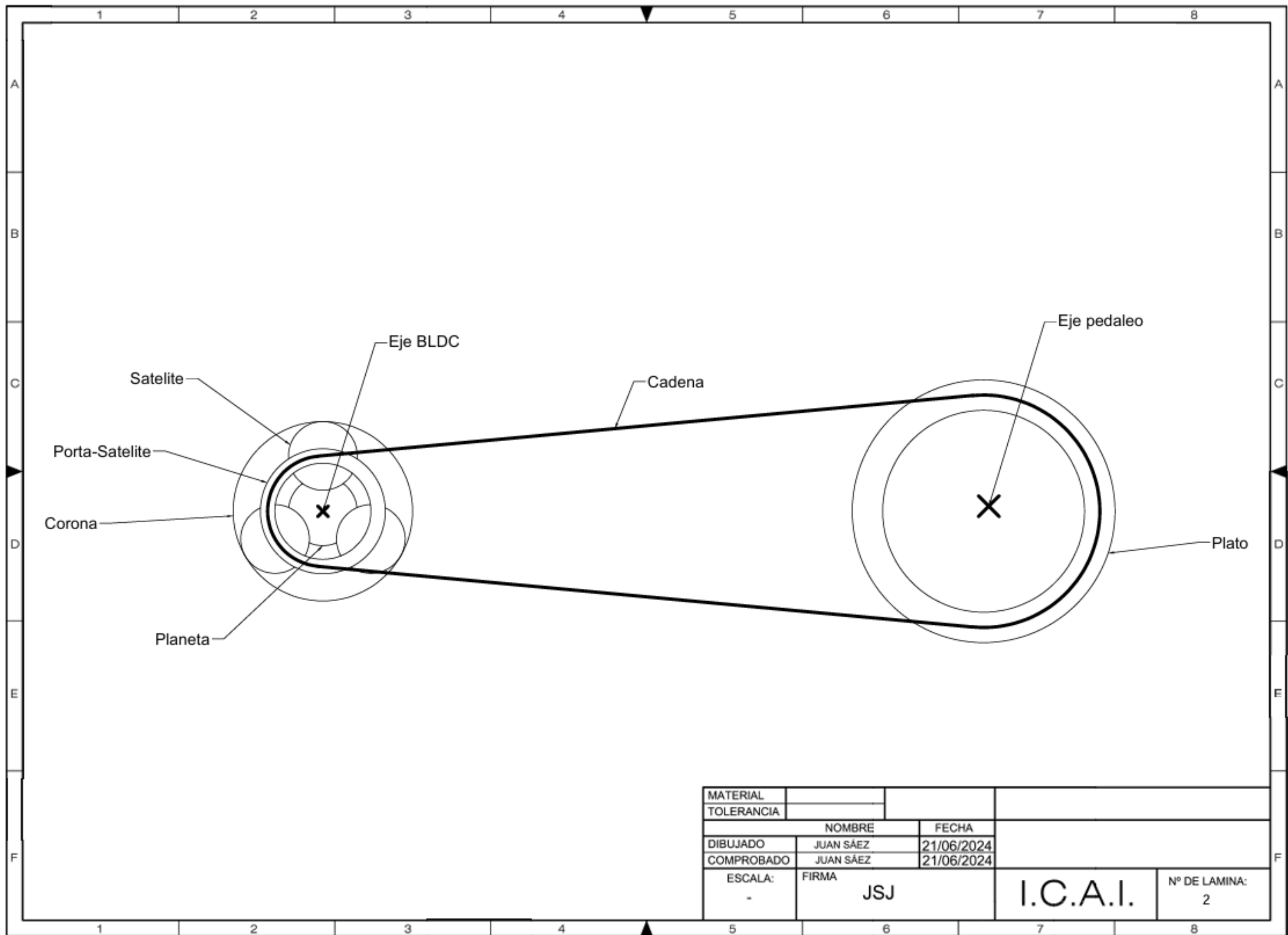
No.	Item	Condition		Pass/Fail	Remarks
1	High Temperature Storage	$80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 96hrs		Pass	Module without contamination
2	Low Temperature Storage	$-30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 96hrs		Pass	
3	High Temperature Operating	60°C , 96hrs		Pass	
4	Low Temperature Operating	-10°C , 96hrs		Pass	
5	High Temperature/Humidity Storage	60°C , 90% RH, 96hrs		Pass	
6	High Temperature/Humidity Operating	40°C , 90% RH, 96hrs		Pass	
7	Thermal Shock	$-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C} \rightarrow 70^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C}$ 30min $\rightarrow$ 30min $\rightarrow$ 30min $\rightarrow$ 30min 10 cycles		Pass	
8	Vibration Test (Packaged)	10Hz ~ 55Hz (1min) Amplitude: 1.5mm Each direction(X,Y,Z) for 2hrs		Pass	
9	Drop Test (Packaged)	Packing Weight (Kg)	Drop Height (cm)		Drop Direction 1 corner 3 edges 6 sides Each time
		0 ~ 45.4	122		
		45.4 ~ 90.8	76		
		90.8 ~ 454	61		
		Over 454	46		
10	Electrostatic Test	Air Discharge Apply 2KV with 5 times discharge for each polarity +/-	Contact Discharge Apply 250V with 5 times discharge for each polarity +/-	Pass	
		1- Temperature ambience: $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 2- Relative Humidity: 30% ~ 60% 3- Energy storage capacitance: $C_s + C_D : 150\text{pF} \pm 10\%$ 4- Discharge Resistance (Rd): $330\Omega \pm 10\%$ 5- Discharge, Mode of operation: Single discharge (time between successive discharges at least 1s) (Tolerance if the output voltage indication: $\pm 5\%$.			



Anexo C: Esquemas







MATERIAL			
TOLERANCIA			
	NOMBRE	FECHA	
DIBUJADO	JUAN SÁEZ	21/06/2024	
COMPROBADO	JUAN SÁEZ	21/06/2024	
ESCALA:	FIRMA		
-	JSJ	I.C.A.I.	Nº DE LAMINA: 2