



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

EDUCATIONAL WIND POWERED CHARGER

Author

María Carrallo Escudero

Supervised by

Jonathon Schuh

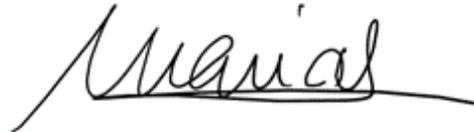
Madrid

Mayo 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
EDUCATIONAL WIND POWERED CHARGER
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/2022 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.: María Carrallo Escudero

Fecha: 09/06/ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL COORDINADOR DE PROYECTOS



Fdo.: Aurelio García Cerrada

20 07 2022
Fecha://



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

EDUCATIONAL WIND POWERED CHARGER

Author

María Carrallo Escudero

Supervised by

Jonathon Schuh

Madrid

Mayo 2022

1. Resumen

EDUCATIONAL WIND POWERED CHARGER

Autor: Carrallo Escudero, María

Director: Shuch, Jonathon

Etidad Colaboradora: University of Illinois at Urbana-Champaign

RESUMEN DEL PROYECTO

En este trabajo de fin de grado se ha diseñado y construido un cargador por conexión USB que utiliza un aerogenerador para generar la electricidad necesaria. Está diseñado para ser montado en una bicicleta y así poder cargar los dispositivos mientras que se monta en ella.

Palabras clave: Aerogenerador, algoritmo MPPT, regulador, USB.

Introducción

A medida que más empresas industriales recurren a la utilización de energías más limpias, la energía eólica se ha convertido en una de las principales fuentes de suministro de energía. Desde el punto de vista de la industria, sería una buena idea enseñar a los alumnos cómo se utiliza esta tecnología en aplicaciones del mundo real. Una aplicación ejemplar sería un generador de electricidad eólica montado en una bicicleta. Muchos ciclistas prefieren montar en zonas salvajes, como montañas, praderas y pistas de grava remotas, donde no hay electricidad. Una herramienta de carga que pueda suministrar energía a los dispositivos electrónicos portátiles sería beneficiosa. Este producto aprovecha el viento y convierte la energía en electricidad. Al montar en la bicicleta, el viento que llega se convertiría directamente en electricidad.

Definición del Proyecto

El proyecto se centra en el diseño de una turbina eólica montada en una bicicleta. Se montará un aerogenerador en la parte delantera de la bicicleta y el dispositivo transformará la energía de la turbina cuando el ciclista esté montando la bicicleta con el viento incidente en las aspas. Un dispositivo de este tipo puede concienciar a la sociedad sobre las energías renovables y la conservación de la energía. Por ello, el proyecto se denomina "Generador eólico educativo".

Objetivos

■ Educación en energía renovable.

A medida que más empresas industriales recurren a la utilización de energías más limpias, la energía eólica se ha convertido en una de las principales fuentes de suministro de energía. Desde el punto de vista de la industria, sería beneficioso educar a los estudiantes sobre este tipo de tecnologías y su utilización en aplicaciones del mundo real.

■ Proporcionar a los usuarios que circulan por zonas remotas con una fuente de energía alternativa.

Muchos ciclistas prefieren circular por zonas naturales como montañas, praderas o

desiertos, donde no hay electricidad o ésta es escasa. Una herramienta de carga que pueda suministrar energía a dispositivos electrónicos portátiles como smartphones, GPS, linternas o radios por satélite, sería beneficiosa.

Estos dispositivos tienen una batería pequeña, pero también consumen poca energía, por lo que es posible cargarlos con fuentes de energía de tamaño reducido, como una pequeña turbina eólica. De esta forma, se aprovecharía el tiempo de las travesías para recargar los dispositivos que el usuario desee, e incluso, si el viento es suficiente, el proyecto podría generar electricidad sin necesidad de estar circulando.

Solución

Se propone un aerogenerador portátil, económico y fácil de usar montado en una bicicleta. Este sistema de recolección de energía debe ser eficiente cuando se monta en una bicicleta. Además, puede proporcionar capacidades de carga de batería a dispositivos portátiles a través de un puerto USB.

Requisitos de alto nivel

- **Sistema portátil.**

El objetivo es generar la energía y proteger el rotor tanto como sea posible. Cuando el viento es demasiado fuerte (20 millas por hora, es decir, 32 kilómetros por hora aproximadamente) para que el rotor gire, el ciclista tiene la opción de retirar temporalmente el sistema del rotor y volver a instalarlo fácilmente.

- **El sistema es capaz de cargar un teléfono móvil.**

El sistema debe proporcionar suficiente potencia (5V y 500mA) cuando el ciclista está conduciendo la bicicleta a 15 mph (24 kph). Al conectarlo por la salida USB del sistema, el teléfono debe mostrar el estado de carga.

- **Las dimensiones totales del sistema no deben superar los 50 cm.**

Con esto, se evita bloquear la vista del conductor para poder evitar posibles accidentes y se asegura que el circuito no pese demasiado y suponga una carga adicional a la hora de circular.

Diagrama de bloques

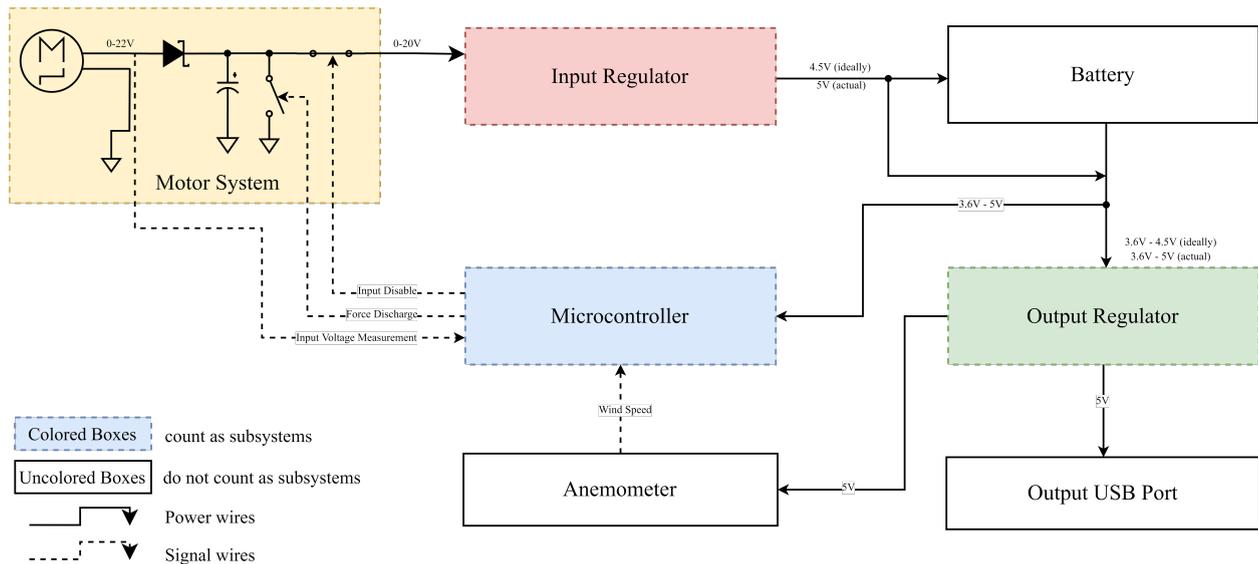


Figura 1: Diseño del diagrama de bloques

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques final del diseño. El circuito sigue siendo en su mayor parte el mismo que el del diseño original, pero la implementación subyacente ha cambiado significativamente. En resumen, el diseño original contaba con un sistema de control analógico que ajustaba la entrada con mayor precisión y respondía a los cambios de entrada de forma más activa, mientras que el nuevo método cuenta con un control digital que es más fácil de implementar, menos propenso a errores y consume menos energía.

Descripción de los bloques

- **Sistema del motor/Motor system** Este subsistema se conecta al aerogenerador y alberga dos interruptores. Un interruptor desconecta el motor del sistema y lo deja girar libremente; otro interruptor conecta la turbina a tierra con una resistencia de 100Ω , extrayendo una cantidad relativamente grande de corriente del motor y frenándolo forzosamente. Los interruptores están controlados por el microcontrolador.
- **Regulador de entrada/Input regulator** Este subsistema acepta la tensión no regulada y la convierte en una salida regulada de $5V$ para cargar la batería.
- **Batería/Battery** Este subsistema alberga un módulo de batería protegido. Tiene protección contra la sobretensión y la subtensión. Servirá para alimentar al puerto USB cuando la velocidad del viento no sea suficiente como para general el voltaje necesario.[1]
- **Regulador de salida/Output regulator** El regulador de salida convierte la energía de la batería en $5V$ para la toma USB.
- **Microcontrolador/Microcontroller** El microcontrolador ejecuta el algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking) y controla el sistema del motor para lograr el se-

guimiento del punto de máxima potencia controlando los interruptores conectados al motor que se han mencionado anteriormente.[2]

Bibliografía

[1] Tenergy. "Tenergy 3.7V 2600mAh Li-Ion 18650 Button Top Rechargeable Battery with PCB". (), [Online]. Available: <https://www.tenergybattery.com/files/ugd/78a53e62683a81bf4c4080bc7b7b63b68fa766.pdf> (visited on 05/03/2022).

[2] Y. Errami, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Control of a pmsg based wind energy generation system for power maximization and grid fault conditions," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 220–229, 2013, Mediterranean Green Energy Forum 2013: Proceedings of an International Conference MGEF-13, ISSN: 1876-6102. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213017244>.

EDUCATIONAL WIND POWERED CHARGER

Author: Carrallo Escudero, María

Supervisor: Schuh, Jonathon

Colaborating entity: University of Illinois at Urbana-Champaign

ABSTRACT In this final degree project, a USB charger that uses a wind turbine to generate the necessary electricity has been designed and built. It is designed to be mounted on a bicycle to charge devices while riding it.

Key words: Wind turbine, MPPT algorithm, regulator, USB

Introduction

As more industrial companies turn to the use of cleaner energy, wind power has become one of the main sources of energy supply. From an industry standpoint, it would be a good idea to teach students how this technology is used in real-world applications. An exemplary application would be a wind-powered electricity generator mounted on a bicycle. Many cyclists prefer to ride in wilderness areas, such as mountains, meadows and remote gravel trails, where electricity is not available. A charging tool that can supply power to portable electronic devices would be beneficial. This product harnesses the wind and converts the energy into electricity. When riding the bicycle, the incoming wind would be converted directly into electricity.

Project Definition

The project focuses on the design of a wind turbine mounted on a bicycle. A wind turbine will be mounted on the front of the bicycle and the device will transform the energy from the turbine when the rider is riding the bicycle with the wind incident on the blades. Such a device can raise society's awareness of renewable energy and energy conservation. Therefore, the project is called "Educational wind generator".

Objetives

- **Renewable energy education.**

As more industrial companies turn to the use of cleaner energy, wind energy has become one of the main sources of energy supply. From an industry standpoint, it would be beneficial to educate students about these types of technologies and their use in real-world applications.

- **Provide users in remote areas with an alternative energy source.**

Many cyclists prefer to ride in natural areas such as mountains, grasslands or deserts, where there is little or no electricity. A charging tool that can supply power to portable electronic devices such as smartphones, GPS, flashlights or satellite radios would be beneficial.

These devices have a small battery, but also consume little energy, so it is possible to charge them with small energy sources, such as a small wind turbine. In this way, the time of the crossings would be used to recharge the devices that the user wants, and even, if the wind is sufficient, the project could generate electricity without the need to be circulating.

Solution

A portable, inexpensive and easy-to-use wind turbine mounted on a bicycle is proposed. This energy harvesting system should be efficient when mounted on a bicycle. In addition, it can provide battery charging capabilities to portable devices through a USB port.

High level requirements

- **Portable system.**

The goal is to generate power and protect the rotor as much as possible. When the wind is too strong (20 mph, or approximately 32 kph) for the rotor to turn, the rider has the option to temporarily remove the rotor system and easily reinstall it.

- **The system is capable of charging a cell phone.**

The system should provide sufficient power (5V and 500mA) when the rider is riding the bike at 15 mph (24 kph). When connected via the USB output of the system, the phone should display the charging status.

- **The overall dimensions of the system should not exceed 50 cm.**

This avoids blocking the driver's view in order to avoid possible accidents and ensures that the circuit does not weigh too much and place an additional burden on the road.

Block Diagram

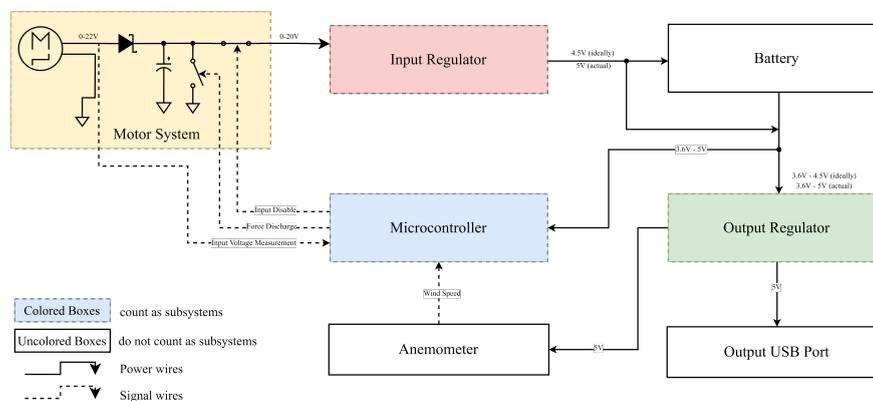


Figura 2: Block diagram design

Figure 2 shows the final block diagram of the design. The circuit remains largely the same as the original design, but the underlying implementation has changed significantly. In short, the original design featured an analog control system that adjusted the input more precisely and responded to input changes more actively, while the new method features digital control that is easier to implement, less error-prone, and consumes less power.

Description of the blocks

- **Motor system** This subsystem is connected to the wind turbine and houses two switches. One switch disconnects the motor from the system and lets it rotate freely; another switch connects the turbine to ground with a 100Ω resistor, drawing a relatively large amount of current from the motor and forcibly braking it. The switches are controlled by the microcontroller.
- **Input regulator** This subsystem accepts the unregulated voltage and converts it to a regulated $5V$ output to charge the battery.
- **Battery** This subsystem houses a protected battery module. It has overvoltage and undervoltage protection. It will serve to power the USB port when the wind speed is not sufficient to generate the required voltage.[1]
- **Output regulator** The output regulator converts the battery power into $5V$ for the USB socket.
- **Microcontroller** The microcontroller runs the MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithm and controls the motor system to achieve maximum power point tracking by controlling the switches connected to the motor mentioned above.[2]

Bibliography

[1] Tenenergy. "Tenenergy 3.7V 2600mAh Li-Ion 18650 Button Top Rechargeable Battery with PCB". (), [Online]. Available: <https://www.tenenergybattery.com/files/ugd/78a53e62683a81bf4c4080bc7b7b63b68fa766.pdf> (visited on 05/03/2022).

[2] Y. Errami, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Control of a pmsg based wind energy generation system for power maximization and grid fault conditions," Energy Procedia, vol. 42, pp. 220–229, 2013, Mediterranean Green Energy Forum 2013: Proceedings of an International Conference MGEF-13, ISSN: 1876-6102. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213017244>.

Índice

1. Resumen	3
2. Introducción	14
3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	15
4. Descripción del modelo	16
4.1. Detalles del diseño	16
4.1.1. Sistema del motor	16
4.1.2. Sistema de regulación de entrada	18
4.1.3. Batería	19
4.1.4. Sistema de regulación de salida	20
4.1.5. Sistema del microcontrolador	21
4.2. Ayuda visual	25
5. Justificación del diseño	26
6. Resultados	30
6.1. Sistema del motor	30
6.2. Regulador de entrada	31
6.3. Regulador de salida	35
6.4. Microcontrolador y Anemómetro	36
7. Dificultades y progreso	40
7.1. Versión inicial de la placa	40
7.1.1. Subsistema de generación de energía	40
7.1.2. Sistema de recolección de energía	41
7.1.3. Sistema de agregación de energía	41
7.1.4. Subsistema de control	41
7.2. Dificultades de la versión final	42
7.2.1. Potencia del motor	42
7.2.2. Señal incorrecta del IC	42
8. Conclusiones	45
8.1. Logros	45
8.2. Incertidumbres	45
8.3. Ética	45
8.4. Trabajo para el futuro	46
Bibliografía	47
Apéndice A. Lista de componentes	48
Apéndice B. Esquemas completos del sistema	51

Apéndice C. Datos de ensayo para los reguladores	54
C.1. Regulador de entrada	54
C.2. Regulador de salida	58
Apéndice D. Código del microcontrolador	62
Apéndice E. Datos medidos para el algoritmo MPPT	66
Apéndice F. Código de las simulaciones	72
F.1. Simulación con MPPT. Figura 12	72
F.2. Simulación sin MPPT. Figura 13	75
F.3. Caída de tensión del regulador de entrada. Figura 16	77
F.4. Eficiencia del regulador de entrada. Figura 17	79
F.5. Rizado del regulador de entrada. Figura 18	81
F.6. Caída de tensión del regulador de salida. Figura 19	83
F.7. Eficiencia del regulador de salida. Figura 20	85
F.8. Rizado del regulador de salida. Figura 21	87

Índice de figuras

1.	Diseño del diagrama de bloques	5
2.	Block diagram design	8
3.	Evolución de la producción eólica del 1 de enero al 25 de marzo (en GWh). .	14
4.	Subsistema del motor	17
5.	Sistema de regulación de entrada	18
6.	Batería	19
7.	Regulador de salida	20
8.	Microcontrolador	21
9.	Conexiones de alto nivel	21
10.	Conexión del anemómetro	21
11.	Curva de punto máximo de potencia	22
12.	Simulación con MPPT	24
13.	Simulación sin MPPT	24
14.	Visualización física del proyecto.	25
15.	Tiempo de reacción del regulador de entrada	33
16.	Caída de tensión del regulador de entrada	33
17.	Eficiencia del regulador de entrada	33
18.	Rizado del regulador de entrada	34
19.	Caída de tensión del regulador de salida	35
20.	Eficiencia del regulador de salida	35
21.	Rizado del regulador de salida	36
22.	MPPT - Puntos de operación óptimos	38
23.	Linea de tendencia para valores bajos de tensión	39
24.	Linea de tendencia para valores altos de tensión	39
25.	Versión inicial del diagrama de bloques	40
26.	Señal A y B medidas en el laboratorio	43
27.	Señal A y B medidas esperadas	43

Índice de tablas

1.	Requerimientos y verificaciones del sistema del motor	30
2.	Resultados de las pruebas del subsistema del motor	31
3.	Requerimientos y verificaciones del sistema del regulador de entrada	32
4.	Requerimientos y verificaciones del sistema del regulador de salida	35
5.	Requerimientos y verificaciones del sistema del microcontrolador	37
6.	Valores de salida del MCU	39
7.	Lista de componentes	48
7.	Lista de componentes (Continuación)	49
7.	Lista de componentes (Continuación)	50
8.	Datos de ensayo para el regulador de entrada	54
8.	Datos de ensayo para el regulador de entrada (Continuación)	55
8.	Datos de ensayo para el regulador de entrada (Continuación)	56
8.	Datos de ensayo para el regulador de entrada (Continuación)	57
9.	Datos de ensayo para el regulador de salida	58
9.	Datos de ensayo para el regulador de salida (Continuación)	59
9.	Datos de ensayo para el regulador de salida (Continuación)	60
9.	Datos de ensayo para el regulador de salida (Continuación)	61
10.	Velocidad del ventilador 2, Distancia 5cm	66
11.	Velocidad del ventilador 2, Distancia 10cm	67
12.	Velocidad del ventilador 2, Distancia 15cm	67
13.	Velocidad del ventilador 2, Distancia 20cm	68
14.	Velocidad del ventilador 3, Distancia 5cm	69
15.	Velocidad del ventilador 3, Distancia 10cm	69
16.	Velocidad del ventilador 3, Distancia 15cm	70
17.	Velocidad del ventilador 3, Distancia 20cm	71
18.	Resultado final del MPPT	71

2. Introducción

En la actualidad, uno de los grandes proyectos de la sociedad es la implementación y expansión de las energías renovables. Entre todas ellas, cabe destacar el impacto de la energía eólica en España, que, según explica la Red Eléctrica de España en un artículo de diciembre de 2021:[1]

- “La eólica ya es la principal fuente de generación eléctrica en España. Las previsiones estiman que la fuerza del viento podría cerrar el año registrando un 23,3% del total de la producción en nuestro país, liderando así el mix de generación nacional por primera vez desde 2013. La energía producida a partir de esta tecnología superará los 60.600 GWh, con un incremento estimado del 10,5% sobre el pasado ejercicio.”
- “Las estimaciones prevén que las tecnologías renovables cerrarán el año representando el 46,6% de toda la electricidad del país – más de 121.500 GWh, un 9,9% más que en 2020 – lo que le llevaría a registrar de esta manera su mayor participación en la estructura de generación desde que se cuenta con registros. La cuota de producción verde de este año supera en 2,6 puntos porcentuales el anterior máximo registrado en 2020.”

Como se observa en los datos aportados por la Red Eléctrica de España en la Figura 3, la evolución e implementación de la energía eólica está en auge.



Figura 3: Evolución de la producción eólica del 1 de enero al 25 de marzo (en GWh).

Teniendo esta idea en mente, se pensó en formas de estimular este progreso en menor escala, al alcance de todos los usuarios, en especial los jóvenes. Es común en uso de bicicletas y teléfonos móviles entre estos individuos, por lo que se pensó en una forma de fomentar el aprendizaje de este recurso con una aplicación que fuera útil para ellos. Otro de los aspectos que se tuvieron en cuenta a la hora de crear este diseño es la posibilidad de facilitar una fuente de electricidad en zonas remotas a los ciclistas.

3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Este proyecto se alinea principalmente con tres objetivos de desarrollo sostenible:

- **Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.**
 - De aquí a 2030, asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles, los derechos humanos, la igualdad de género, la promoción de una cultura de paz y no violencia, la ciudadanía mundial y la valoración de la diversidad cultural y la contribución de la cultura al desarrollo sostenible.
- **Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.**
 - De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos
 - De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.
- **Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.**
 - De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
 - De aquí a 2030, asegurar que las personas de todo el mundo tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza.[2]

4. Descripción del modelo

4.1. Detalles del diseño

La lista de componentes empleados se encuentra adjunta en el Anexo A.

4.1.1. Sistema del motor

Selección del motor y de las aspas Para las aspas, se seleccionó una turbina de tres aspas con una longitud de $R = 22\text{cm}$. La selección procede de la suposición de una densidad normal del aire $\rho = 1,2\text{kg}/\text{m}^3$ (bajo $T = 20^\circ\text{C}$) y una eficiencia de captación del viento $\eta = 40\%$ (la eficiencia óptima de conversión del viento es de 0,59, pero hay que tener en cuenta la limitación a la hora de realizar ensayos físicos).[3]

$$P = \frac{\pi}{2} \cdot r^2 \cdot v^3 \cdot \rho \cdot \eta = 11.003W \quad (1)$$

Para elegir el generador, utilizando las aspas anteriores, se empleó la relación de velocidad de punta $TSR = 1,5$, suponiendo una velocidad aparente del viento de $v = 6,7\text{m}/\text{s}$ (15mph), pudiendo así calcular la velocidad de rotación en rotaciones por minuto (RPM) con la siguiente ecuación.[4]

$$60 \cdot v \cdot TSR / (2\pi R) = 60 \cdot 6.7 \cdot 1.5 / (\pi \times 0.44) = 440.14RPM \quad (2)$$

En condiciones extremas, como un viento de 60 mph ($v = 26,8\text{m}/\text{s}$), $r = 1746,38RPM$. El resultado final es inferior a las 3500 rpm nominales del motor empleado, lo que significa que la turbina soportará en esas condiciones.

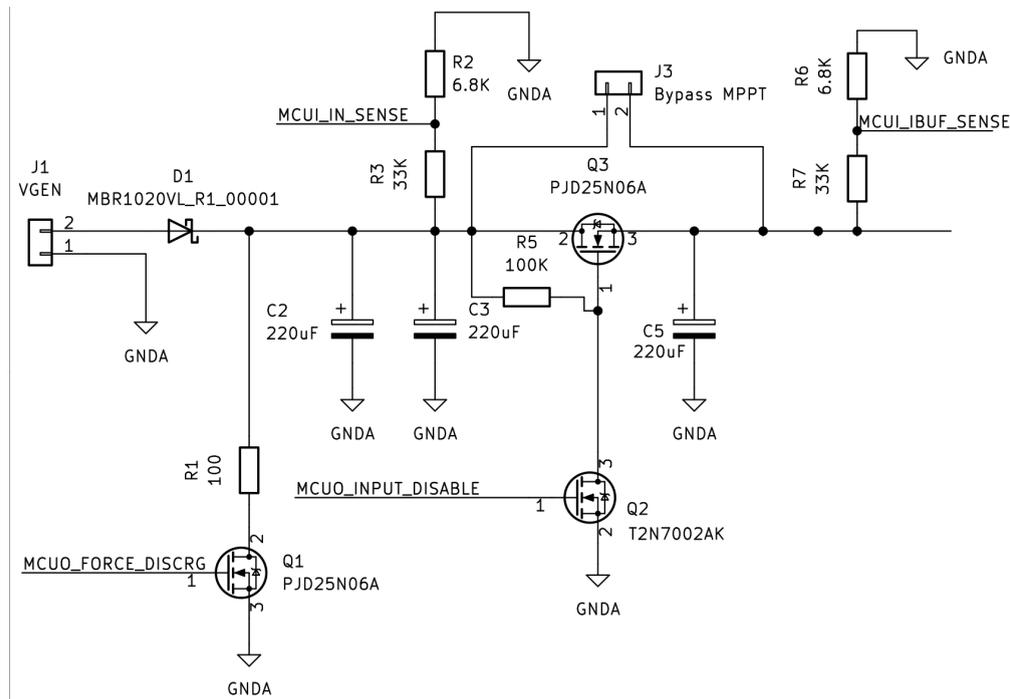


Figura 4: Subsistema del motor

La Figura 4 muestra el diseño del sistema del motor. En los puntos óptimos de funcionamiento, la potencia del motor tiene una tensión relativamente alta ($> 10V$) pero una corriente baja. El transistor Q1 se encarga de la descarga del motor, y la resistencia R1 controla la velocidad de descarga. La resistencia R1 es de mayor tamaño y esto le permite disipar el calor. El transistor Q2 es un transistor de pequeña señal que evita que la alta tensión de pull-up llegue al microcontrolador. El transistor Q3 actúa como un interruptor. Q1, Q2 y Q3 tienen una tensión de ruptura de V_{DS} de $60V$, muy por encima de la tensión máxima que el motor puede generar bajo 60mph de viento. Las tensiones antes y después del interruptor son medidas por el microcontrolador a través de divisores de tensión.

Cuando la señal MCUO_INPUT_DISABLE se pone en alto, el motor se desconecta del sistema y cuando la señal MCUO_FORCE_DISCHARGE se pone en alto, la corriente se extrae a la fuerza del motor y lo ralentiza. La lógica del sistema se analizará más en profundidad en el apartado dedicado al microcontrolador.

4.1.2. Sistema de regulación de entrada

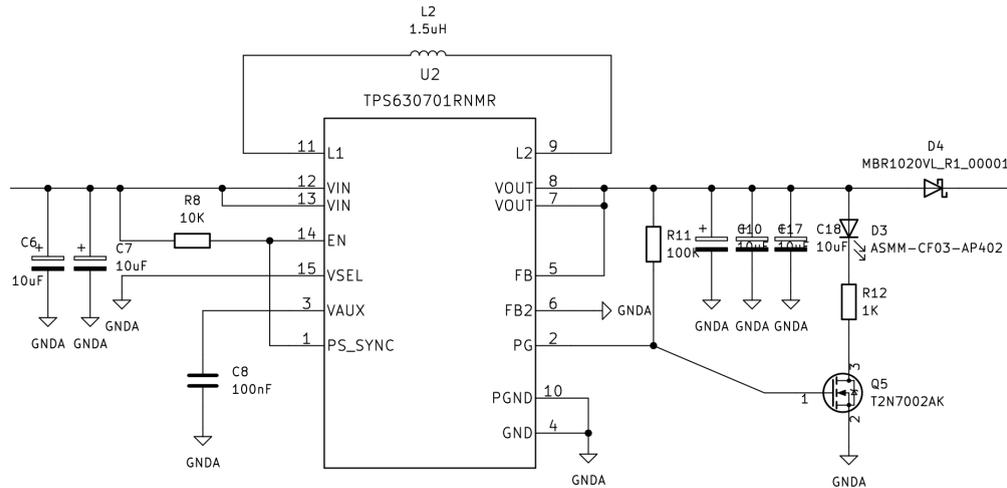


Figura 5: Sistema de regulación de entrada

La figura 5 muestra el esquema del regulador de entrada. El IC (Integrated Circuit) TPS630701RNMR es un convertidor DC/DC buck-boost (convertidor reductor-elevador) con transistores[5] incorporados. Se utilizó la arquitectura buck-boost porque permite un amplio rango de tensiones de entrada y proporciona una buena eficiencia. Gracias a la selección de la estructura buck-boost, este regulador opera cuando la tensión de entrada supera los 2V en un rango hasta los 20V y tiene una salida de 5V, ideal para cargar la batería. Se empleó este IC con transistores incorporados porque evita tener complicados diseños de placa de varias capas, y está diseñado para trabajar en aplicaciones de baja potencia.

La elección del inductor L2 es importante para el funcionamiento seguro y eficiente del circuito. Para que el circuito sea eficiente, se prefieren los inductores de bobina a los inductores de chip, ya que los inductores de chip tienen una mayor pérdida en el núcleo. El valor del inductor determina la corriente de rizado y la respuesta transitoria de la carga. Cuanto mayor sea el inductor, menor será la corriente de rizado y más lenta será la respuesta transitoria de la salida

Para calcular la corriente de pico que pasa por el inductor, se utilizó la siguiente ecuación:

$$DutyCycle = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}$$

$$I_{PEAK} = \frac{I_{out}}{\eta \cdot (1 - DutyCycle)} + \frac{V_{in} \cdot DutyCycle}{2 \cdot f \cdot L}$$

Los valores se eligieron como sigue:

- $V_{OUT} = 5V$.
- $V_{IN} = 3V$. Límite inferior de la entrada, cuando la corriente de pico es la más alta.
- $\eta = 0,7$. Eficiencia estimada del convertidor. Una menor eficiencia provoca una mayor corriente de pico. Se emplea un 70 % por seguridad.
- $I_{out} = 1A$. Corriente de salida estimada. Dado que la salida del motor nunca superó $1W$ cuando se midió con carga electrónica, la corriente no debería superar los $200mA$. Se ha utilizado $1A$ por seguridad para casos extraordinarios.
- $f = 2.1MHz$. Frecuencia de conmutación del regulador. La frecuencia de funcionamiento del controlador es de $2,4MHz$, pero puede ralentizarse en operaciones de baja potencia. Una frecuencia más baja conduce a una mayor corriente de pico. Se empleó $2.1MHz$, la frecuencia más baja a la que opera se proporciona en la hoja de datos.
- $L = 1.5\mu H$. Un valor recomendado y equilibrado como se proporciona en la ficha de datos.

4.1.3. Batería

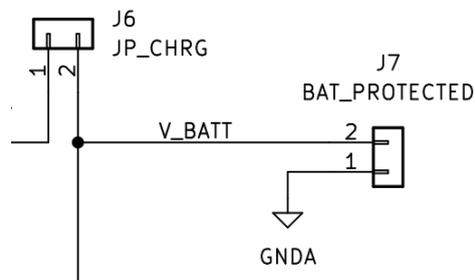


Figura 6: Batería

Como se muestra en la Figura 6, hay un conector que se conecta a una batería en la placa. JP6 es un puente para la depuración, y JP7 es el conector a la batería. El sistema requiere una batería de iones de litio de una sola célula que puede cargar a $200mA$, descargar a $1A$ y puede manejar $1A$ de corriente de carga en casos excepcionales. El producto de Tenergy satisfizo las necesidades que se buscaban en el diseño de la batería para este producto.[6]

Tiene una capacidad de carga continua de $520mA$, carga rápida de $1.3A$ y descarga de $3.5A$. La capacidad no es un factor muy importante en la elección, siempre y cuando no sea tan pequeña que se sature rápidamente (aproximadamente $500mAh$ mínimo). Esta batería tiene una capacidad de $2600mAh$.

El algoritmo MPPT producirá la máxima cantidad de corriente posible en cada momento, pero los componentes de uso frecuente no están dispuestos a tomar cualquier cantidad de corriente de entrada, por lo que no son adecuados para ser conectados directamente. Una batería sin procesar puede aceptar la carga en un amplio rango de corriente, por lo que es esencial para el funcionamiento del MPPT. Se utiliza un circuito de protección para evitar la sobrecarga, la infracarga o la sobrecorriente.

4.1.4. Sistema de regulación de salida

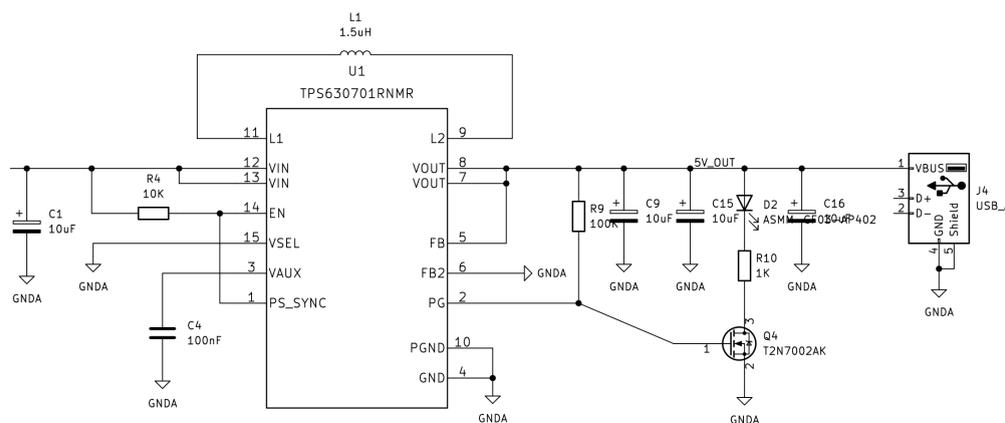


Figura 7: Regulador de salida

Como se muestra en la Figura 7, el regulador de salida tiene el mismo diseño que el regulador de entrada, ya que los requisitos son los mismos. Hay dos diferencias: hay menos condensadores en la entrada ya que la entrada proviene de una batería y no se espera que fluctúe significativamente y no hay diodo en la salida, por lo que no hay caída de tensión.

El regulador de salida toma una tensión de entrada de la batería o del regulador de entrada y la convierte en 5V para el puerto USB. El tensión de salida debe cumplir con la especificación USB, entre 4.75 – 5.25V

4.1.5. Sistema del microcontrolador

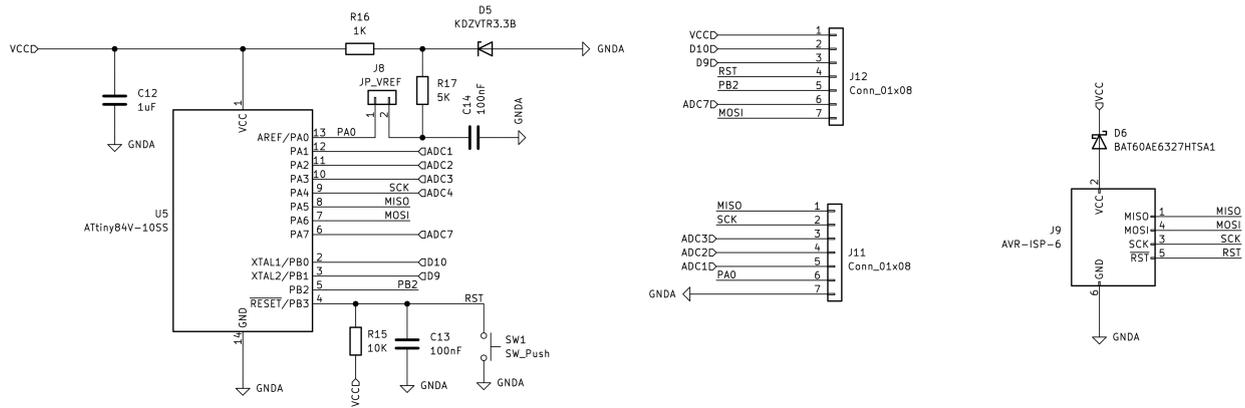


Figura 8: Microcontrolador

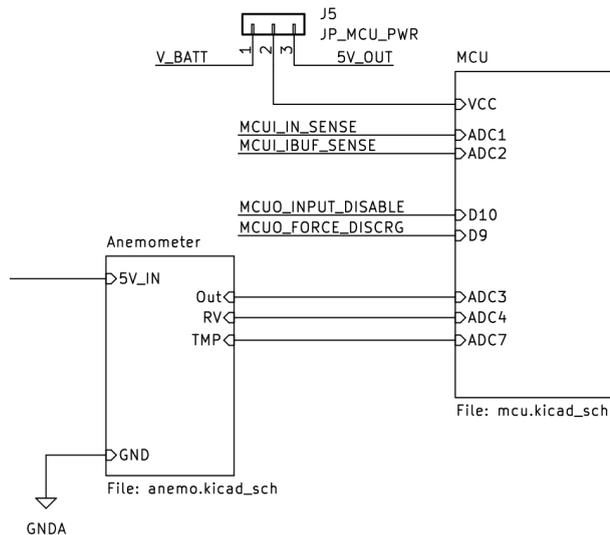


Figura 9: Conexiones de alto nivel

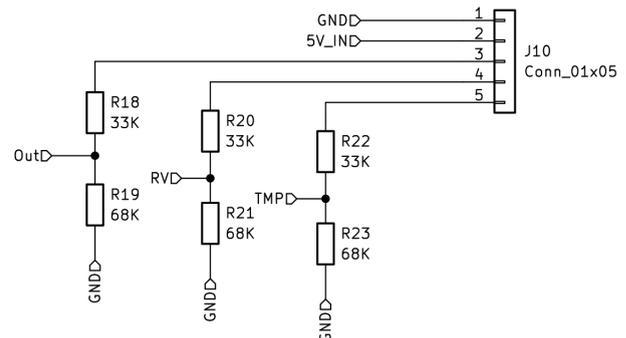


Figura 10: Conexión del anemómetro

La figura 9 muestra las conexiones de alto nivel entre el microcontrolador y el anemómetro, y la Figura 8 muestra el cableado del propio microcontrolador. El microcontrolador puede ser alimentado por dos fuentes de energía: puede ser alimentado desde la batería, en cuyo caso se proporciona una tensión de referencia externa de 3,3V para las operaciones del ADC y también puede ser alimentado desde el pin de 5V, por lo que no se

necesita una tensión de referencia externa. Todas las entradas analógicas están diseñadas para saturar a $3,3V$ para ser compatibles con ambos modos de funcionamiento.

Anemómetro

El anemómetro empleado en este diseño es un anemómetro térmico basado en el método del "hilo caliente". El anemómetro calienta un cable y el viento que sopla sobre él lo enfría. Por lo tanto, la resistencia del cable cambia con respecto a la condición del viento. Cuando el viento es rápido, la temperatura del cable baja y su resistencia disminuye, produciendo una diferencia de tensión que puede ser amplificada y medida.

Proporciona tres señales: RV significa valor bruto, que no se utiliza. TMP es un sensor de temperatura que ajusta la lectura con respecto a la temperatura ambiente, y Out es la lectura de la tensión de salida. Las tres señales se envían al microcontrolador para su cálculo y uso en el algoritmo MPPT.

Este anemómetro necesitaba ser calibrado para su correcto uso, al ser muy sensible a la temperatura del ambiente. Para ello, en el código se emplea una variable `ZeroWindVolts`. Para calibrarlo el proceso a seguir era aislar el anemómetro en una caja para asegurar que no hubiera viento y calibrar esta variable hasta obtener un valor de 0mph en la salida de la velocidad del viento calculada. La sensibilidad del anemómetro fue un gran problema al cambiar drásticamente las medidas tomadas en el laboratorio, por ello, se tomaron varias medidas en distintas condiciones y se reajustaba el anemómetro previamente a cada sesión de laboratorio.

Algoritmo del MPPT

A una velocidad de viento determinada, la relación tensión-potencia de la salida del motor alcanza su pico a una determinada tensión y se hace cero a tensiones altas o bajas. Y. Errami et al. investigó esta relación y obtuvo el siguiente gráfico.[7]

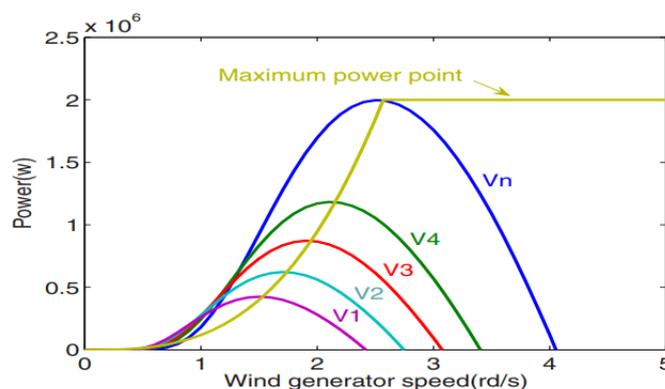


Figura 11: Curva de punto máximo de potencia

En la Figura 11, la velocidad del generador eólico está directamente relacionada con la tensión de salida del motor y las curvas $V_1...V_n$ representan diferentes velocidades del viento, donde V_1 es la más baja y V_n la más alta. Es obvio que buscar el punto de máxima potencia es esencial para lograr una mayor eficiencia.

En primer lugar, se midieron las mejores tensiones de funcionamiento con diferentes velocidades del viento para la turbina específica que se estaba utilizando. La tensión óptima a cada velocidad del viento se midió con una carga electrónica: la turbina se acciona con un ventilador y los terminales de salida se conectan a la carga electrónica. La carga electrónica se coloca en modo de tensión constante, y se barre lentamente la tensión para encontrar el momento en que la potencia es máxima. El proceso se repite para múltiples velocidades del viento y el resultado se ajusta a una curva.

El algoritmo es el siguiente: cuando se alcanza el equilibrio, la fuerza de Coulomb del motor, la fuerza del viento y la fricción se equilibran. Al extraer la corriente del motor se genera una fuerza de Coulomb en el interior del motor en el sentido inverso al que está girando, ralentizándolo. Para mantener el motor en torno a la mejor velocidad de giro, lo único que se tiene que hacer es ajustar la corriente que se extrae, para que la tensión siga siendo óptima.

El microcontrolador mide la velocidad del viento, calcula la tensión de funcionamiento óptima y la compara con la tensión de salida actual del motor. Se plantean cuatro posibles situaciones:

- **La tensión de entrada supera los 16V.** Este valor de tensión está por encima del rango adecuado y podría ser dañino para el circuito, por ello, se activa la señal `MCUO_FORCE_DISCHARGE`.
- **La tensión actual del motor es demasiado alta.** se activa la entrada y se toma la corriente. Como resultado, el motor se ralentiza, la tensión de salida disminuye y la corriente aumenta.
- **La tensión del motor es demasiado baja.** se deshabilita la entrada, por lo que se deja al motor girar libremente y se acelera, aumentando así la tensión.
- **La tensión del motor es óptima.** Esto ocurre cuando la tensión generada es superior a la óptima pero no supera los 16V. Se activa la entrada al regulador de entrada y se alimenta al sistema con la tensión y corriente generada por el motor para cargar la batería.

Este método no es absolutamente preciso y sensible, porque se necesita tiempo para que el microcontrolador reaccione, pero como se ve en la Figura 11, se va a ser capaz de dejar que el motor funcione en un rango que tiene una mayor eficiencia.

Las Figuras 12 y 13 muestran una simulación en las mismas condiciones, con o sin utilizar MPPT. Como se muestra en la Figura 12, cuando la tensión del motor es superior a la tensión óptima, el dispositivo toma corriente de él para cargar la batería. La figura 13 muestra el mismo sistema sin utilizar el MPPT y la carga siempre está conectada al motor. Con el MPPT el sistema fue capaz de ganar 437.522,43 mJ y sin él sólo 275.612,73 mJ. Por lo tanto, está claro que la implementación del MPPT aportará una mejora del rendimiento al proyecto.

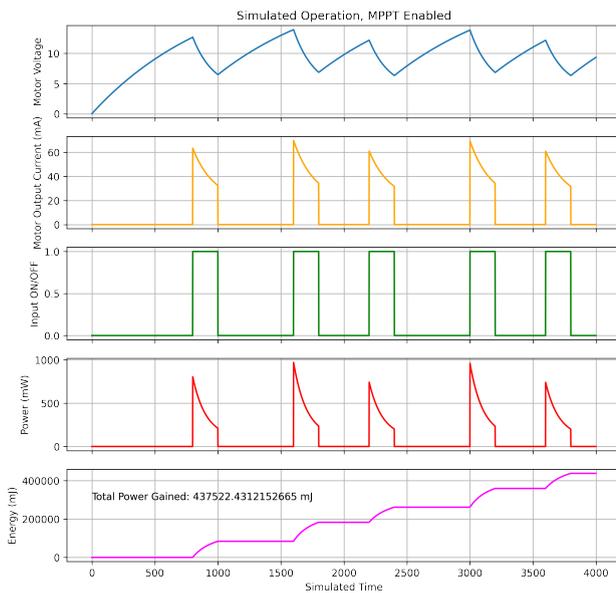


Figura 12: Simulación con MPPT

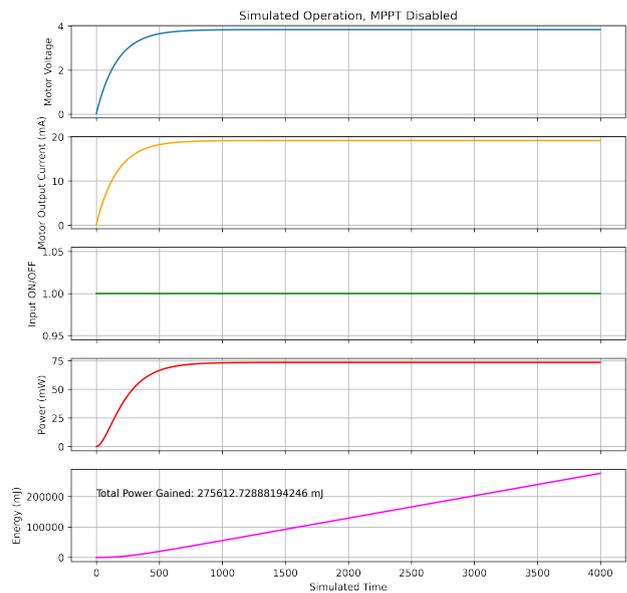


Figura 13: Simulación sin MPPT

El código de las simulaciones se encuentra en el Apéndice F

4.2. Ayuda visual



Figura 14: Visualización física del proyecto.

La Figura 14 muestra el producto terminado. Un motor con una pequeña turbina está montado en la parte delantera de la bicicleta, un anemómetro está montado al lado de la rueda delantera, y la placa se encuentra en la caja negra bajo el asiento del ciclista.

Los esquemas completos del sistema se encuentran adjuntos en el Apéndice B.

5. Justificación del diseño

A continuación se razonará el proceso de selección y la relevancia de algunos de los componentes del sistema para la producción de un sistema exitoso. La idea general del diseño es cosechar la máxima cantidad de energía del sistema del motor. Originalmente se planteó no utilizar ninguna batería y conectar directamente el motor a un regulador y posteriormente a la salida. Sin embargo, después de algunas consideraciones, este diseño apenas funcionaría por su baja eficiencia y la dificultad a la hora de mantener una salida de $5V$ constante.

Lo que diferencia este sistema a los ofrecidos en el mercado o a un simple generador eólico es que lo que se quiere conseguir es poder cargar el dispositivo conectado por USB en cualquier instante, independientemente de la velocidad del viento que haya en ese momento. Esto se consigue gracias al algoritmo MPPT que se implementa en el sistema y de el que se detallará el funcionamiento próximamente.

En primer lugar, la potencia del sistema del motor es muy pequeña, pero los dispositivos alimentados por USB, como los teléfonos, necesitan una cantidad adecuada de corriente para reconocer el estado de carga. La especificación USB 2.0 exigía un mínimo de $100mA$ para los puertos de baja potencia y un mínimo de $500mA$ para los puertos de alta potencia [8, pp. 178, Tabla 7-7].

Un cargador USB se define en la mayoría de casos como un puerto de alta potencia, sin embargo, el motor alcanza un máximo de $1W$ durante los ensayos realizados en el laboratorio. Incluso si el sistema fuera totalmente eficiente, no podría proporcionar una salida de $5V$ y $500mA$ a otros dispositivos. Esto se debe a que cuando el circuito consume demasiada corriente, la tensión de salida del regulador desciende fuera del rango de tensión especificado por el USB. Por los motivos razonados y expuestos previamente, se debe incluir una batería.

Las ventajas ofrecidas por incluir un módulo de batería incluyen que puede cargarse con cualquier corriente de carga por debajo de su límite. Cuando no hay ningún dispositivo conectado al puerto USB, el sistema puede cargar la batería y cuando hay un dispositivo conectado, el sistema puede cargar el dispositivo utilizando la energía almacenada de la batería.

En segundo lugar, la característica tensión-corriente de un motor es muy especial. A grandes rasgos, puede modelarse como una fuente de tensión de alta impedancia, pero eso no es del todo cierto. Bajo una velocidad de viento específica, un motor tiene

una tensión de funcionamiento óptima, en el que puede producir la máxima cantidad de energía[7]. Sin embargo, un aparato conectado al puerto USB no tiene en cuenta la fuente de alimentación anterior al puerto USB y no puede controlar la cantidad de corriente extraída del motor para conseguir la mejor eficiencia. Por lo tanto, se debe implementar un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y un circuito para hacer que el motor funcione en el mejor punto de funcionamiento, como se ha mencionado anteriormente.

El algoritmo MPPT requiere una salida que acepte la energía generada, pero un aparato conectado al puerto USB no puede comportarse como tal al necesitar una tensión y corriente continua de valor constante. Esto se debe a que la potencia no es lo suficientemente alta en todo momento, sino que además la cantidad de energía generada va a ser fluctuante debido a la implementación del MPPT y a los cambios en la velocidad del viento que afecta al sistema.

Si el microcontrolador detecta que el voltaje cae demasiado cuando se está tomando corriente, el sistema puede dejar de tomar corriente del puerto USB. En estos casos, no se está extrayendo corriente del motor a través del regulador de tensión, por lo que la velocidad de rotación del motor no se reduce y como consecuencia la tensión de salida del motor no bajará a la tensión óptima, haciendo que la ejecución del MPPT falle y se desperdicie energía. Por lo tanto, se necesita una reserva que pueda absorber cualquier cantidad de energía que se le entregue, y esa reserva se ha asignado a una batería.

Por lo tanto, una batería es esencial en el sistema, y éste se centra en cargar la batería interna con la máxima eficiencia. Una batería de litio suele emitir $3,7 - 4,2V$ de tensión, por lo que es necesario un regulador de salida. Este regulador debe convertir la tensión de la batería en $5V$ para cumplir con las especificaciones del USB.

Cargar una batería de litio es una práctica habitual. Normalmente, la fuente de alimentación utilizada para cargar una batería de litio de una sola célula se ajusta a $4,4V$ como máximo, con una corriente de salida dentro de los límites de la batería. Cuando la batería no está completamente cargada, la batería consume toda la corriente disponible, y la tensión de la fuente de alimentación cae a un nivel ligeramente superior al de la batería. Durante el proceso, la tensión a través de la batería aumenta. Cuando se completa la carga, la tensión de la batería aumenta, se acerca a la tensión máxima suministrada, consume menos corriente y finalmente se detiene cuando las tensiones de la batería y del suministro coinciden y la fuente de alimentación ya no es capaz de suministrar corriente a la batería.

Originalmente en el diseño, se quería construir un regulador de 4,5V como regulador de entrada y añadir un diodo Schottky para evitar la corriente inversa, así como deducir una caída de tensión. Sin embargo, la versión de salida variable del IC de control que se empleó, TPS63070, estaba fuera de stock.

Se consideraron otras soluciones, como utilizar dos reguladores para el aumento y la disminución de la tensión, respectivamente, y utilizar un comparador para decidir qué regulador activar. Sin embargo, añadir un comparador requiere otro sistema de alimentación para alimentarlo, lo que complica el diseño y aumenta el consumo de energía de todo el sistema. Se optó por utilizar una variante de salida fija, TPS630701 para sustituirlo, que tiene una salida fija de 5V. Cuando la batería no está totalmente cargada, puede seguir tomando corriente del regulador y regular su tensión de salida hasta el nivel actual de la batería, haciendo que la salida del regulador se comporte como una fuente de corriente. La placa de protección de la batería detecta la sobretensión y corta la carga cuando la batería está completamente cargada.

En lo relevante al diseño del MPPT. Previamente, se midió y ensayó en el laboratorio la tensión de funcionamiento óptima del aerogenerador a diferentes velocidades del viento con el uso de cargas electrónicas, y la relación entre la velocidad del viento y la tensión óptima de salida del generador se ajustó a una curva y se programó en el microcontrolador.

Cuando el sistema está funcionando, el microcontrolador mide la velocidad del viento, comprueba la curva y calcula la mejor tensión de funcionamiento. Si la tensión actual del motor es superior a la óptima, el microcontrolador ordena al circuito que extraiga corriente del motor, lo ralentice y reduzca la tensión hasta la óptima. Si la tensión actual del motor es inferior a la óptima, el microcontrolador ordena al circuito que desconecte el motor, de modo que no se consume corriente y el motor se acelera, aumentando su tensión de salida.

Aparte del MPPT, cuando la velocidad del viento es demasiado alta y el circuito no puede absorber suficiente corriente para frenar el motor, el microcontrolador debe ser capaz de absorber la corriente del motor por otros medios. Por lo tanto, el subsistema del motor está diseñado para tener dos interruptores: uno de ellos sirve para conectar o desconectar el motor, y el otro para extraer la corriente del motor y ralentizarlo.

El microcontrolador debe tener muchos pines de I/O para tomar las entradas del anemómetro, medir la tensión de entrada y controlar el motor. También es preferible que el microcontrolador consuma poca energía, ya que el consumo de energía de la MCU es

un componente importante en la potencia de funcionamiento en espera del sistema. Por lo tanto, se seleccionó el microcontrolador para ser ATtiny84V. Puede funcionar directamente desde la tensión de la batería y consume poca energía. También tiene modos de apagado que se pueden emplear para ahorrar energía.

6. Resultados

Como verificación de cada uno de los subsistemas que forman el proyecto, se establecieron unos requerimientos y su proceso de verificación para comprobar el funcionamiento del circuito. Junto a esto, se incluirán los resultados de las simulaciones que se han llevado a cabo en cada subsistema.

6.1. Sistema del motor

Requerimiento	Verificación
Cuando la toma de entrada recibe alimentación y ninguna señal de control está activada, la alimentación pasa a la salida.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Aplicar 12V a la entrada con una fuente de alimentación de laboratorio. 2) Verificar que la salida está en torno a los 12V, con un diodo y una caída de V_{GS}.
El motor puede ser desconectado a petición del microcontrolador.	<p>(Continuando con lo anterior)</p> <ol style="list-style-type: none"> 3) Poner el pin <code>MCUO_INPUT_DISABLE</code> en HIGH (5V). 4) Verificar que la salida cae a alrededor de 0, y no se extrae corriente de la fuente de alimentación del laboratorio.
El motor puede ser frenado a la fuerza a petición del microcontrolador.	<p>(Continuando con lo anterior)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Poner un límite de corriente de 50mA en la fuente de alimentación del laboratorio. 2) Poner el pin <code>MCUO_INPUT_DISABLE</code> en LOW y poner el pin <code>MCUO_FORCE_DISCRG</code> en HIGH. Verificar que se está extrayendo más corriente de la fuente de alimentación y la tensión de alimentación debería haber caído.
El sistema debe ser capaz de tolerar que la turbina gire en sentido inverso.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Aplicar -12V a la entrada con una fuente de alimentación de laboratorio. 2) Verificar que no se consume corriente de la alimentación. 3) Comprobar que la salida no es negativa.

Tabla 1: Requerimientos y verificaciones del sistema del motor

El subsistema del motor se ensaya junto con el regulador de entrada. En la salida del regulador de entrada hay un LED que indica si se ha alimentado. Las lecturas de tensión y corriente provienen de la fuente de alimentación. La Tabla 2 muestra los resultados de las pruebas del subsistema de motor. Como se muestra, las señales `MCUO_FORCE_DISCRG` y `MCUO_INPUT_DISABLE` están funcionando como se esperaba.

Tensión de entrada(V)	Corriente de entrada(A)	FORCE_DISCRG	INPUT_DISABLE	Estado del LED
12.00	0.001	LOW	LOW	ON
12.00	0.000	LOW	HIGH	OFF
5.14	0.050	HIGH	HIGH	OFF
12.00(Reversed)	-0.000	LOW	LOW	OFF

Tabla 2: Resultados de las pruebas del subsistema del motor

6.2. Regulador de entrada

Para el regulador de entrada, la preocupación principal se centraba en el tiempo de puesta en marcha y su eficiencia. Debido al algoritmo MPPT, el regulador se encenderá y apagará, por lo que el tiempo de arranque del regulador es importante para que el MPPT funcione correctamente. El microcontrolador ejecuta su algoritmo una vez cada $1000ms$; por ello, se requiere que el regulador se ponga en marcha en un plazo de $100ms$ desde que la entrada esté disponible.

Requerimiento	Verificación
<p>El módulo debe ser capaz de tomar corriente de la entrada en un plazo de $100ms$ a medida que la entrada aumenta hasta $4V$.</p>	<p>1) Conectar una fuente de alimentación del laboratorio a la entrada y al canal 1 del osciloscopio. Conectar el terminal positivo de la batería al canal 2. Apagar la fuente de alimentación de laboratorio. Ajustar el osciloscopio para que se dispare el borde ascendente del canal 1 a $2V$.</p> <p>2) Ajustar la fuente de alimentación del laboratorio a $4V$ y encenderla. El osciloscopio debe dispararse. Observar la diferencia de tiempo entre la subida del canal 1 y el canal 2. No debe superar los $100ms$.</p>
<p>Cuando la entrada ascienda por encima de los $4V$ hasta los $15V$, la salida debe ser de $5V$.</p>	<p>(Continuando con lo anterior)</p> <p>3) Cambiar la tensión de salida de la fuente de alimentación del laboratorio a través del rango, verificar que la salida es de $5V$.</p>
<p>Cuando la salida está limitada a $3,7 - 4,2V$ por la batería, el regulador deberá seguir proporcionando corriente.</p>	<p>(Continuando con lo anterior)</p> <p>4) Conectar una batería a la salida, en serie con un amperímetro. Verificar que la corriente fluye hacia la batería, aunque la señal de Power Good pueda estar apagada.</p>
<p>Cuando la batería se está cargando desde la entrada y la salida está desactivada, la eficiencia de la carga debe ser de alrededor del 80%</p>	<p>(Continuando con lo anterior)</p> <p>5) Medir la tensión de entrada, la corriente de entrada, la tensión de la batería y la corriente de la batería</p> <p>6) Comprobar que la diferencia entre la potencia total de entrada y la potencia de carga no supere el 20%.</p>

Tabla 3: Requerimientos y verificaciones del sistema del regulador de entrada

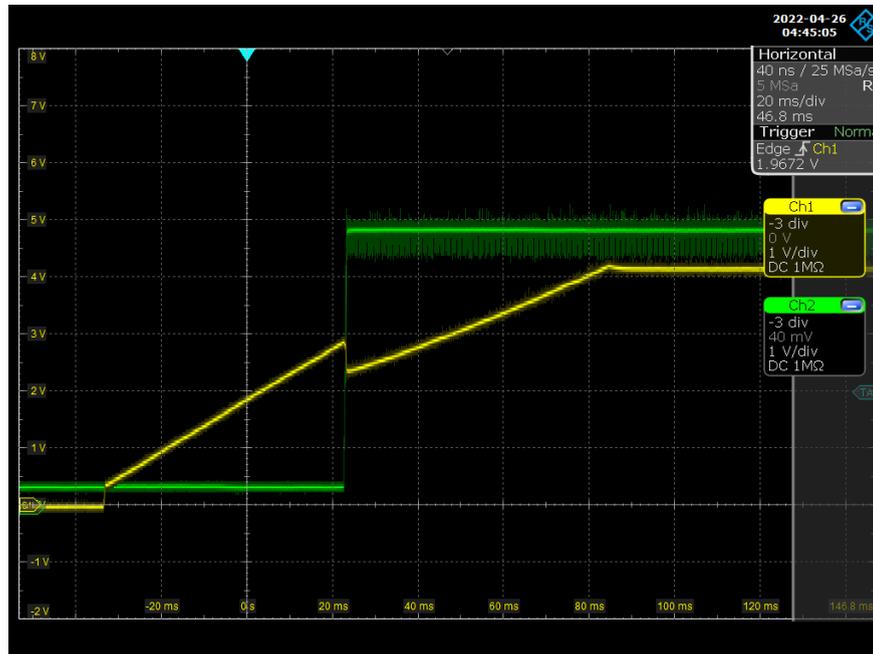


Figura 15: Tiempo de reacción del regulador de entrada

La Figura 15 muestra el rendimiento de arranque del regulador de entrada. Arrancó en unos 60 ms, lo que cumple el criterio especificado.

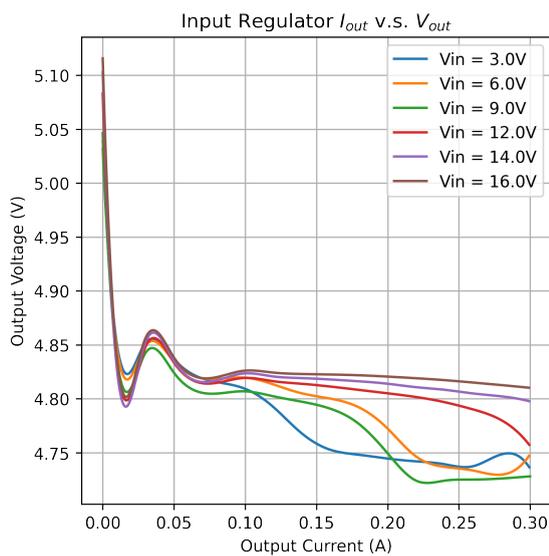


Figura 16: Caída de tensión del regulador de entrada

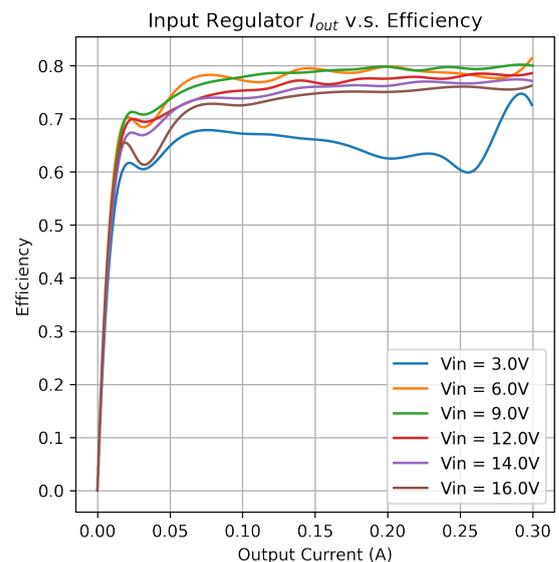


Figura 17: Eficiencia del regulador de entrada

La Figura 16 muestra la caída de tensión de salida en el regulador de entrada. El regulador cumple con el requisito de emitir $5V$ y es capaz de mantener $300mA$ de corriente de salida. La caída de tensión es esperada debido al diodo, y está dentro de la tolerancia. La funcionalidad no se verá perjudicada mientras la tensión de salida esté por encima de $4,4V$.

La Figura 17 muestra la eficiencia. La eficiencia del regulador no alcanzó el objetivo de 80% que se estableció en los requisitos, pero está muy cerca del objetivo. La pérdida de eficiencia se debe en parte a la inclusión de un diodo y un indicador LED conectados a la salida que no se pueden apagar y no se incluyen en la medición de la potencia.

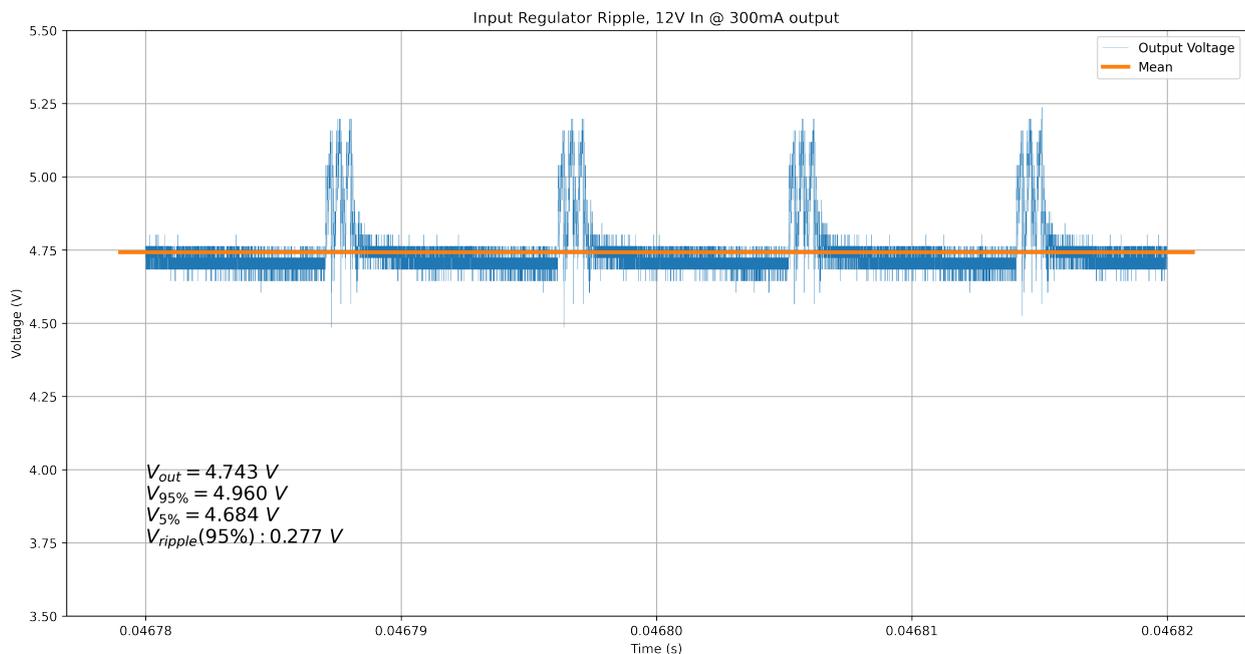


Figura 18: Rizado del regulador de entrada

La Figura 18 muestra el rizado de la salida cuando se está consumiendo $300mA$ de corriente. La cantidad de rizado se mantiene dentro de la tolerancia, y el voltaje es siempre suficiente para cargar la batería.

El código de las simulaciones se encuentra en el Apéndice F

6.3. Regulador de salida

Requerimiento	Verificación
Cuando no hay carga conectada, la salida debe ser de 5V.	1) Conectar una batería o una fuente de alimentación de laboratorio de 3,9V, 2A a la línea de entrada para simular una batería. 2) Medir la tensión de salida. Debe ser alrededor de 5V.
La línea de 5V debe ser capaz de proporcionar 500mA de corriente cuando la energía está disponible en el sistema.	(Continuando con lo anterior) 3) Conectar la línea de salida de 5V a una carga electrónica y extraer 500mA de corriente. El voltaje debe permanecer dentro del rango de especificaciones del USB (4,75 – 5,25V)
El dispositivo conectado por USB debería mostrar que se está cargando	Conectar un teléfono al puerto USB y ver el símbolo de carga.

Tabla 4: Requerimientos y verificaciones del sistema del regulador de salida

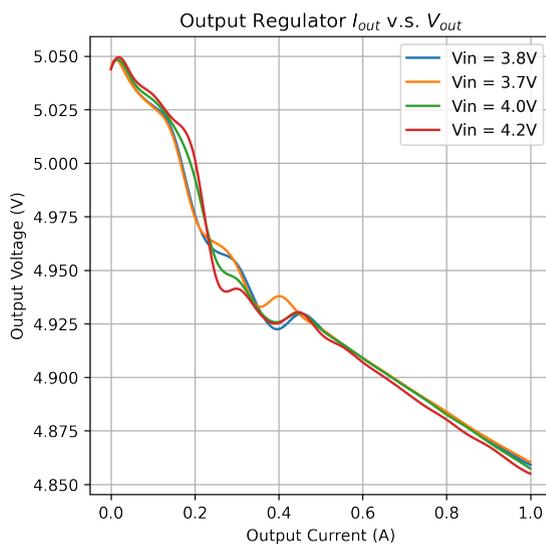


Figura 19: Caída de tensión del regulador de salida

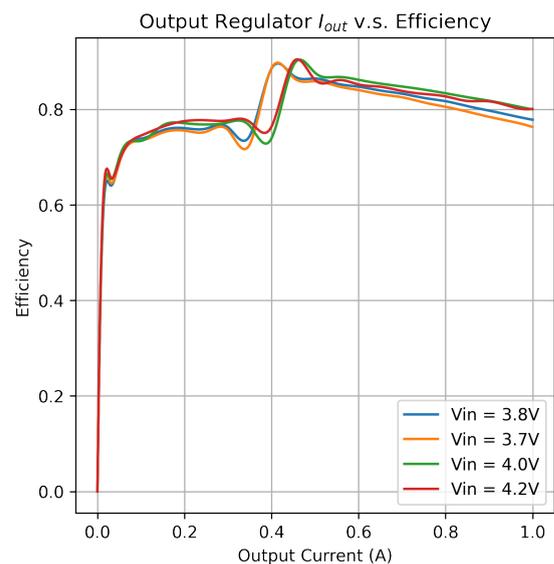


Figura 20: Eficiencia del regulador de salida

Las Figuras 19 y 20 muestran la caída de tensión de salida y la eficiencia cuando se ejecuta a diferentes tensiones de entrada. La caída de tensión del regulador de salida es menor que la del regulador de entrada debido a la falta de diodo. Como se puede observar, la eficiencia también es mayor, especialmente a corrientes de salida más altas.

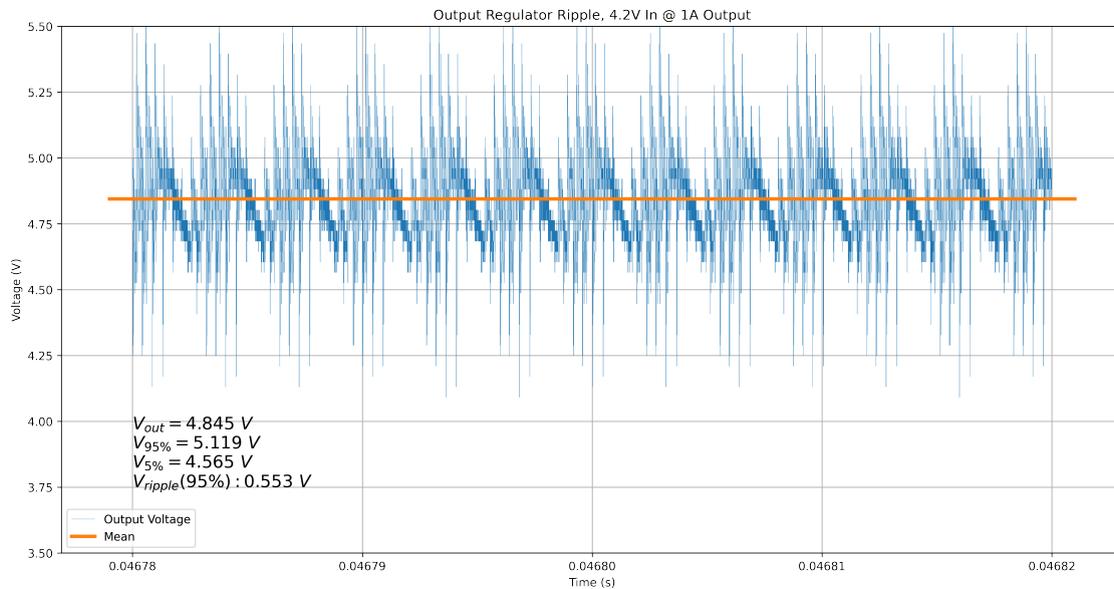


Figura 21: Rizado del regulador de salida

La Figura 21 muestra el rizado de salida. Como se puede ver, la tensión de rizado es más alta de lo deseado cuando se suministra 1A de corriente. Centrándose en la mejora y optimización del producto, se deberían tomar medidas para reducir el rizado de salida, como elegir un inductor más grande para el puente H en el diseño buck-boost, añadir inductores en serie de la salida o añadir más condensadores a la salida.

Los datos empleados para las simulaciones y los ensayos realizados tanto para el regulador de entrada como para el de salida se encuentran adjuntos en el Apéndice C.

El código de las simulaciones se encuentra en el Apéndice F

6.4. Microcontrolador y Anemómetro

El código utilizado para el microcontrolador se puede encontrar en el Apéndice D.

Requerimiento	Verificación
El microcontrolador debe desactivar la entrada de energía si la tensión de entrada es inferior a la óptima.	1) Alimentar el microcontrolador desde el cable USB programador/UART. Utilizar el osciloscopio para medir la señal D10 (MCUO_INPUT_DISABLE). 2) Soplar viento sobre el anemómetro, comprobar la salida de tensión óptima en el microcontrolador. 3) Utilizando la fuente de alimentación del laboratorio, proporcionar a la entrada una tensión inferior a la óptima. El pin D10 debe pasar a alto.
El microcontrolador debe habilitar la entrada de energía si la tensión de entrada es superior a la óptima.	(Siguiendo lo anterior) 4) Proporcionar a la entrada una tensión superior a la óptima. La clavija D10 debe ir a bajo.

Tabla 5: Requerimientos y verificaciones del sistema del microcontrolador

El sistema tiene algunas medidas de seguridad:

- Insuficiente viento: cuando la fuerza proporcionada a las aspas por la velocidad del viento no es suficiente, el sistema no tomará corriente de él, por lo que girará a mayor velocidad.
- Viento adecuado: cuando la fuerza proporcionada es eficiente para el sistema, éste tomará corriente del regulador para cargar la batería.
- Viento excesivo: como medida de seguridad, para cuando hay demasiado viento y las aspas giran a una velocidad demasiado alta, se ha implementado un interruptor de fuerza de descarga para que consuma una gran cantidad de corriente y reduzca la velocidad de las aspas.

Antes de instalar el sistema, se midieron las mejores tensiones de funcionamiento con diferentes velocidades del viento. Los datos completos de los ensayos se encuentran en el Apéndice E

1. Montar el aerogenerador y el anemómetro en una pinza de mesa. Conectar el aerogenerador a la carga electrónica. Conectar el anemómetro al microcontrolador.
2. Poner el ventilador delante de la turbina y encenderlo.

3. Registrar la tensión de salida del anemómetro y la velocidad del viento.
4. Poner la carga electrónica en modo de tensión constante. Hacer un barrido de la tensión de 9,5V a 13V con un paso de 0,5V. Registrar la corriente y la potencia para cada punto de datos.
5. Mover la ubicación del ventilador o cambiar la configuración de la velocidad del ventilador. Repetir desde el paso 2.
6. Después de probar un número suficiente de velocidades de viento, crear una línea de tendencia con la mejor tensión para el generador en función de la tensión de salida del anemómetro, como se ve en la Figura 22

El microcontrolador calcula la mejor tensión de funcionamiento en función de la entrada del anemómetro, basándose en los datos medidos con los pasos indicados anteriormente.

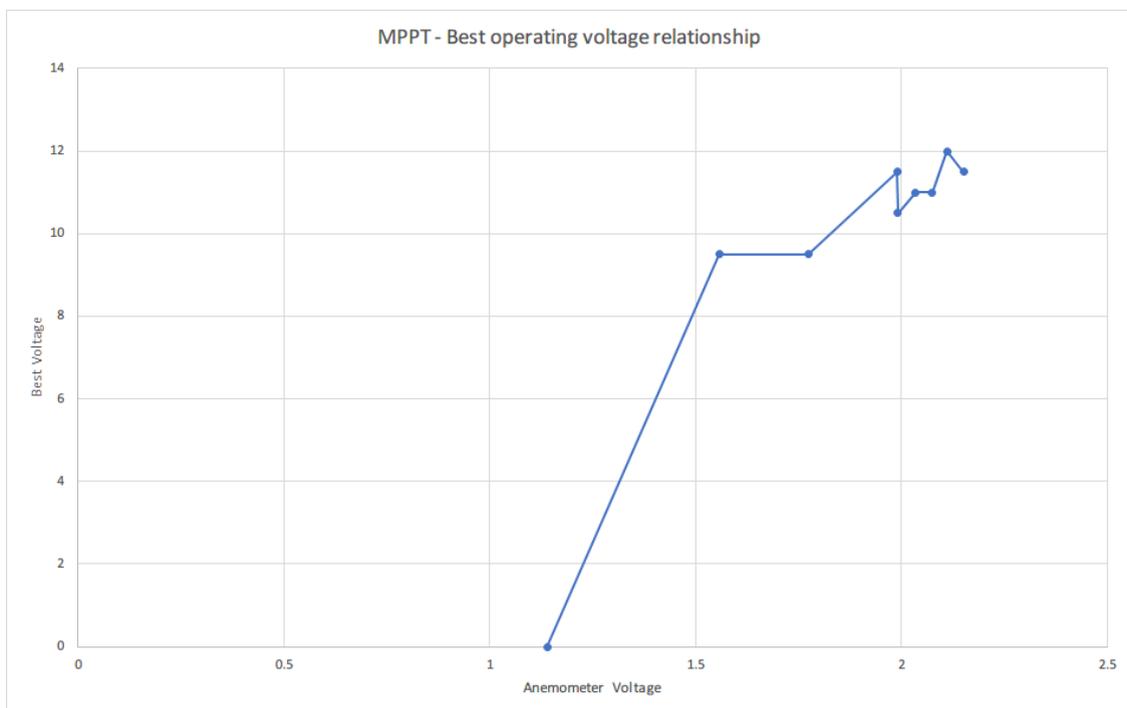


Figura 22: MPPT - Puntos de operación óptimos

Como se observa en la Figura 23 y en la Figura 24, la línea de tendencia se dividió en dos partes debido a la diferente pendiente de la curva. El valor inicial del gráfico es la tensión de salida proporcionada por el anemómetro cuando no había viento, el valor de la variable ZeroWindVolts, y a medida que la velocidad del viento aumenta, la tensión del anemómetro también aumenta.

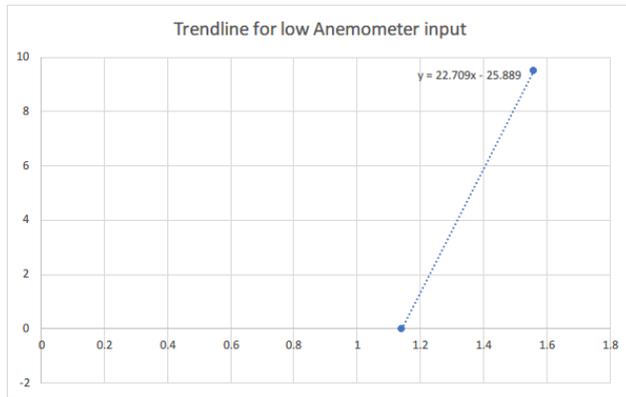


Figura 23: Línea de tendencia para valores bajos de tensión

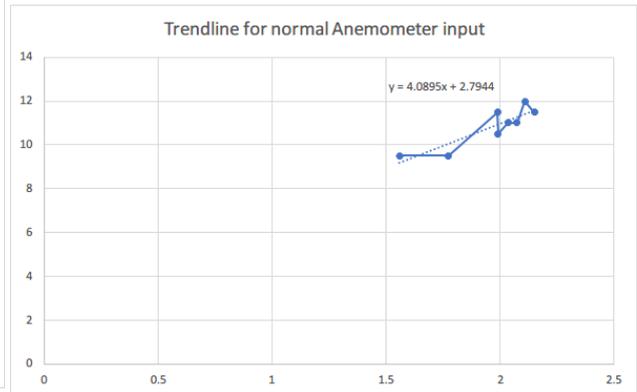


Figura 24: Línea de tendencia para valores altos de tensión

La verificación general del sistema de microcontrolador se realiza con el anemómetro y la batería conectados y se registró todo el proceso. El anemómetro se montó en la mesa y se sopló con un ventilador. La Tabla 6 muestra dos puntos que se han extraído de la consola serie. Se puede concluir que el sistema funciona.

Vout anemómetro	Best Voltage	Tensión de entrada	INPUT_DISABLE
2.454V	12.83V	12.02V	HIGH
2.261V	12.04V	13.02V	LOW

Tabla 6: Valores de salida del MCU

7. Dificultades y progreso

En este apartado se tratarán dos temas principales: la versión inicial de la placa y los problemas y correcciones de la versión final de la placa. Inicialmente, el esquema que se iba a emplear para contruir este dispositivo era distinto. En concreto, la versión final es la tercera versión de la placa.

7.1. Versión inicial de la placa

Como se observa en la Figura 25, el sistema era bastante más complejo y contaba con cuatro bloques principales.

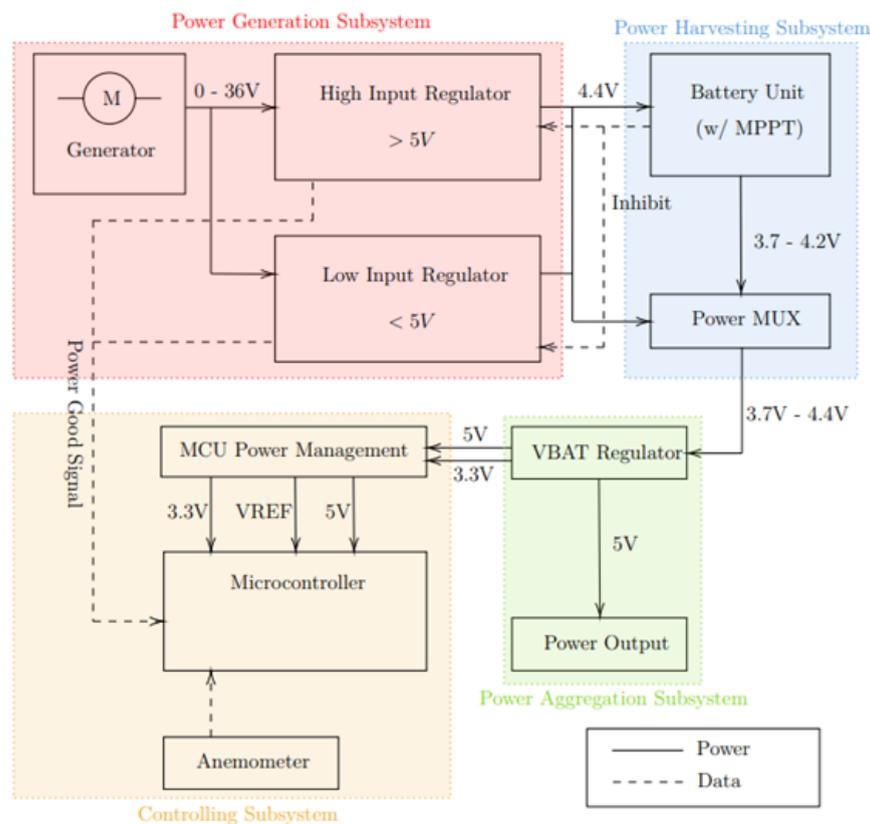


Figura 25: Versión inicial del diagrama de bloques

7.1.1. Subsistema de generación de energía

Este subsistema contiene el aerogenerador, los puentes de diodos AC/DC, los amortiguadores y los reguladores. Genera energía a partir de la energía eólica y proporciona una salida inestable de 4,4V. La capacidad de corriente de esta salida de 4,4V no es fiable.

La tensión de la fuente del generador del motor puede considerarse como una fuente de energía de alta impedancia. Cuando se extrae corriente del motor, la corriente generará una fuerza electromagnética en el motor en la dirección inversa, haciendo que se ralentice y reduciendo su tensión de salida.

Esta unidad también emite una señal de "Power Good" que indica que la tensión de entrada está dentro de rango de funcionamiento. Esta señal será consumida por el microcontrolador.

Este sistema debe proporcionar una salida de 5V y una señal cuando haya suficiente energía eólica. Cuando no hay energía eólica, no debería emitir señal y no se espera ninguna salida.

7.1.2. Sistema de recolección de energía

Este subsistema contiene una batería y su cargador de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). El cargador MPPT controlará la corriente de carga de la batería para conseguir la máxima potencia de entrada. Este tipo de unidades son habituales en muchas energías renovables, como los paneles solares y las turbinas eólicas.

El sistema contiene un MUX de potencia. Cuando se dispone de energía del generador, se prioriza el uso de la energía de los reguladores como su salida.

Cuando el generador no proporciona suficiente energía, el MUX utilizará la energía de la batería. La salida del MUX depende de las condiciones del viento y fluctúa debido a la carga de la batería. La salida es de 3,7V a 4,4V.

Este sistema debe ser capaz de cargar desde una fuente de alimentación inestable y proporcionar una tensión de salida siempre disponible.

7.1.3. Sistema de agregación de energía

Este subsistema toma la tensión de la batería, la convierte en 3,3V y 5V y la entrega al subsistema de control y a la salida. Proporciona una salida estable y fiable de 5V y 3,3V a la toma de corriente y al subsistema de control.

7.1.4. Subsistema de control

Este subsistema contiene el sensor (anemómetro) y la unidad de microcontrolador. El microcontrolador controlará la velocidad del viento y decidirá el punto de máxima potencia para la turbina eólica. Detecta con precisión la velocidad del viento y realiza análisis dinámico del MPPT.

La segunda versión de la placa seguía manteniendo esta estructura para el diagrama de bloques con cambios en los valores de algunos componentes.

7.2. Dificultades de la versión final

A lo largo del desarrollo del producto, ha habido dificultades por varios motivos como errores de soldadura, piezas que no cumplían las especificaciones de diseño proporcionadas por el vendedor, un consumo superior de energía al esperado, etc. Estos retos y sus soluciones se explicarán a continuación.

7.2.1. Potencia del motor

Con los cálculos iniciales, se estimó obtener una potencia del sistema de aspas de alrededor de $10W$, con los que se contaba para el reparto de consumo de energía del circuito. Sin embargo, y tras ensayar con tres motores distintos, el mayor valor de potencia obtenida se encontraba en torno a $1W$. Como se ha mencionado anteriormente, esto supuso un problema en el consumo del sistema, si no se realizaba ningún cambio en el sistema, independientemente de la velocidad de rotación de las aspas, el circuito consumía energía de la batería y no era capaz de cargarlo. Esto fue medido con un amperímetro, al comprobar que la corriente en la batería se mantenía en valores negativos.

Ante este problema, se plantearon tres posibles soluciones.

- Eliminar el anemómetro. Se comprobó con ensayos en el laboratorio que la principal fuente de consumo de energía del sistema era el anemómetro. Este elemento sirve para calcular el valor óptimo en cada momento de tensión, se comprobó que este valor se situaba en torno a los $12V$ y que si se eliminaba esta parte del código y se le asignaba un valor fijo, el circuito operaba correctamente. Esta solución no era la mejor ya que reducía enormemente la eficiencia del circuito.
- Emplear un anemómetro con menor consumo. Un posible sustituto habría sido un tubo de Pitot, sin embargo, por plazos de entrega del proyecto no fue posible sustituir este elemento.
- Emplear un generador que cumpla con las especificación de $10W$. No haría falta que llegara a esos valores, con superar al valor actual probablemente fuera suficiente para que el sistema fuera capaz de cargar la batería. De nuevo, por plazos de entrega no se pudo obtener un nuevo motor.

7.2.2. Señal incorrecta del IC

Tras terminar de soldar la segunda versión de la placa, se comprobó que la señal de salida del regulador IC no era la correcta.

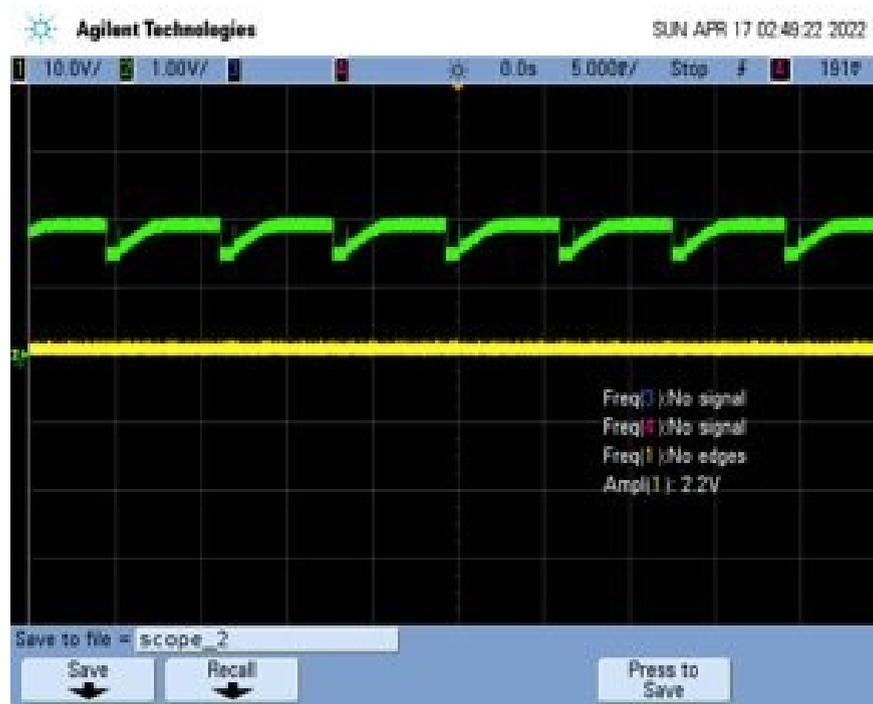


Figura 26: Señal A y B medidas en el laboratorio

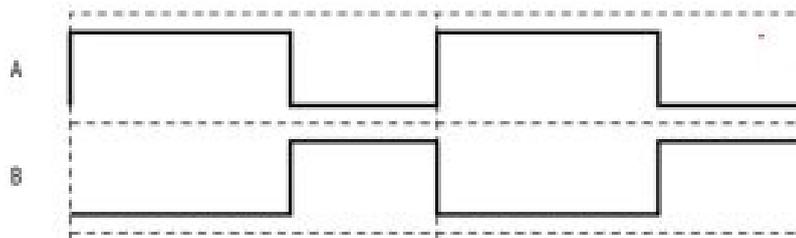


Figura 27: Señal A y B medidas esperadas

Las señales medidas con el material del laboratorio se observan en la Figura 26. A diferencia de las señales de la Figura 27, el comportamiento de la señal que el IC implementado en el sistema no era la correcta y no concordaba con los datos ofrecidos por el vendedor. Por este fallo, el algoritmo del MCU no funcionaba correctamente y algunos componentes se quemaron, ya que la respuesta no concordaba con el comportamiento típico de las señales del convertidor de estructura buck-boost. Buscando una explicación para este comportamiento se llegaron a dos posibles conclusiones.

- Error en la temperatura de soldadura. Para el proyecto se empleó soldadura sin

plomo, la cual requiere una mayor temperatura de fundición. Aunque no se especificaba en la información del producto, es posible que al usar una mayor temperatura de la común se alteraran valores de referencia internos del componente, obteniendo así las señales atípicas que fueron medidas.

- El componente era muy complejo para el diseño. Al investigar sobre el uso de este componente, se observó que se usaba en placas más complejas, normalmente de seis capas. Por este motivo, puede que no se estuviera conectando correctamente el dispositivo por falta de conocimiento de componentes tan complejos.

Estas dificultades pudieron ser estudiadas y resueltas en la medida de lo posible, concluyendo así con un proyecto satisfactorio.

8. Conclusiones

8.1. Logros

En general, se han cumplido todos los requisitos de alto y bajo nivel. El cargador de energía eólica es capaz de cargar la batería en una situación de viento normal. En cuanto al algoritmo MPPT, el control digital MPPT se utiliza para combatir el problema de la baja potencia de salida del autogenerador y funciona sin problemas bajo la velocidad normal del viento cuando los ciclistas están montando la bicicleta. La lógica MPPT es capaz de controlar los momentos de carga y descarga bajo situaciones de viento normales y extremas.

En cuanto al diseño del circuito, se ha diseñado una placa de circuito impreso que contiene circuitos eficientes para convertir tensiones, cargar una batería y soportar situaciones inesperadas. Es capaz de cosechar la energía del viento y cargar eficientemente una batería con la ayuda del algoritmo MPPT.

8.2. Incertidumbres

En cuanto al algoritmo MPPT, la precisión para predecir el punto de máxima potencia sigue siendo cuestionable. Actualmente, se utiliza un simple ventilador para medir el punto de máxima potencia y la velocidad del ventilador con diferentes ensayos. Como resultado, la velocidad del viento y la salida de tensión del anemómetro pueden no corresponder al punto de máxima potencia. Habría que establecer un equipo y un entorno de pruebas mejores para obtener mejores lecturas.

8.3. Ética

Siguiendo las directrices del Código de Ética del IEEE, este proyecto se desarrolla para dar prioridad a la seguridad, la salud y el bienestar del público.[9] Todos los mecanismos que se han diseñado son seguros para ser acoplados a una bicicleta, para evitar cualquier posible accidente debido a que una pieza del proyecto se caiga o distraiga al ciclista.

Para gestionar este problema, es imprescindible realizar pruebas exhaustivas en diferentes condiciones meteorológicas y tomar las precauciones necesarias para proteger a los usuarios del laboratorio de las lesiones, a fin de asegurarse de que no se fabrica ningún objeto peligroso y de que el producto en sí es funcional.

También hay que destacar algunos criterios del proyecto relacionados con el aspecto medioambiental. Dado que el proyecto tiene una finalidad educativa, es necesario adquirir conocimientos sobre el aspecto medioambiental después de utilizar el producto. Por esta razón, todos los componentes utilizados cumplen la normativa RoHS y están soldados sin plomo.

8.4. Trabajo para el futuro

- **Utilizar anemómetros más eficientes para ayudar al MPPT.** Como el anemómetro de hilo caliente actual está consumiendo demasiada energía, el cambio a un anemómetro de menor consumo de energía debería ser el camino a seguir. En concreto, los sensores de presión de menor consumo deberían ser la forma correcta de calcular la velocidad del viento. Otra opción podría ser permitir que el microcontrolador aprenda el valor de tensión perfecto por sí mismo. Específicamente, el microcontrolador tendría la capacidad de ajustar la tensión y ver si ese valor da una mayor potencia e inclinarse hacia una dirección de mayor potencia.
- **Investigar sobre aspas o motores más eficientes para conseguir la potencia teórica óptima.** En el semestre se han comprado tres motores generadores y se han probado, resultando que el tercer generador sí proporciona mayor potencia. Por lo tanto, es posible encontrar un mejor motor que pueda producir mayor cantidad de potencia.
- **Realizar mediciones MPPT más precisas** En el procedimiento de prueba, se utilizó un ventilador como herramienta principal para obtener la tensión y la potencia del anemómetro y el punto de máxima potencia del generador. Sin embargo, la medición del anemómetro y del punto de máxima potencia del generador no puede realizarse al mismo tiempo, ya que el ventilador es demasiado pequeño. En su lugar, se dividió la medición en dos ensayos diferentes y se asumieron que ambos ensayos tenían las mismas condiciones de viento, lo que puede llevar a inconsistencias entre las dos mediciones. En su lugar, se debería utilizar un túnel de viento con el tamaño adecuado para crear una tabla de datos más preciso de MPPT.

Bibliografía

- [1] R. E. de España. «"La eólica se convierte en la principal fuente de generación de energía eléctrica en España en 2021".» (), dirección: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2021/12/la-eolica-se-convierte-en-la-principal-fuente-de-generacion-de-energia-electrica-en-espana-en-2021> (visitado 03-06-2022).
- [2] N. Unidas. «"Objetivos de Desarrollo Sostenible".» (), dirección: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (visitado 06-05-2022).
- [3] J. Webprojects. «"Wind Turbine Power Calculator".» (), dirección: <https://rechneronline.de/wind-power/> (visitado 03-05-2022).
- [4] windynation. «"Tip Speed Ratio: How to Calculate and Apply TSR to Blade Selection".» (), dirección: <https://www.windynation.com/jzv/inf/tip-speed-ratio-how-calculate-and-apply-tsr-blade-selection> (visitado 03-05-2022).
- [5] "TPS63070 2-V to 16-V Buck-Boost Converter With 3.6-A Switch Current datasheet (Rev. B)", Rev. B, Texas Instruments, 2019. dirección: <https://www.ti.com/product/TPS63070>.
- [6] Tenergy. «"Tenergy 3.7V 2600mAh Li-Ion 18650 Button Top Rechargeable Battery with PCB".» (), dirección: https://www.tenergybattery.com/_files/ugd/78a53e_62683a81bf4c4080bc7b7b63b68fa766.pdf (visitado 03-05-2022).
- [7] Y. Errami, M. Ouassaid y M. Maaroufi, «Control of a PMSG based Wind Energy Generation System for Power Maximization and Grid Fault Conditions,» *Energy Procedia*, vol. 42, págs. 220-229, 2013, Mediterranean Green Energy Forum 2013: Proceedings of an International Conference MGEF-13, ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.022>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213017244>.
- [8] "Universal Serial Bus Specification", Rev. 2.0, USB-IF, abr. de 2000.
- [9] IEEE. «"IEEE Code of Ethics".» (2016), dirección: <https://www.ieee.org/about/corporate/governance/p7-8.html> (visitado 08-02-2020).

Apéndice A Lista de componentes

Tabla 7: Lista de componentes

Referencia	Cantidad	Valor	Nombre	Descripción
C1, C9, C10, C15, C16, C17, C18	7	10uF	C_Polarized	Polarized capacitor
C2, C3, C5	3	220uF	C_Polarized	Polarized capacitor
C4, C8, C11, C13, C14	5	100nF	C_Capacitor	Unpolarized capacitor
C6, C7	2	100uF	C_Polarized	Polarized capacitor
C12	1	1uF	C	Unpolarized capacitor
D1, D4	2		MBR1020VL_R1.00001	Schottky diode
D2, D3	2		ASMMCF03AP402,LED	Light emitting diode
D5	1		KDZVTR3.3B,D_Zener	Zener diode
D6	1		BAT60AE6327HTSA1	Schottky diode
J1	1	Vgen	Conn_01x02	Generic connector, single row, 01x02
J2	1	JP_OUT	Conn_01x02	Generic connector, single row, 01x02
J3	1	Bypass MPPT	Conn_01x02	Generic connector, single row, 01x02
J4	1	USB_A	USB_A	USB Type A connector
J5	1	JP_MCU_PWR	Conn_01x03	Generic connector, single row, 01x03
J6	1	JP_CHRG	Conn_01x02	Generic connector, single row, 01x02

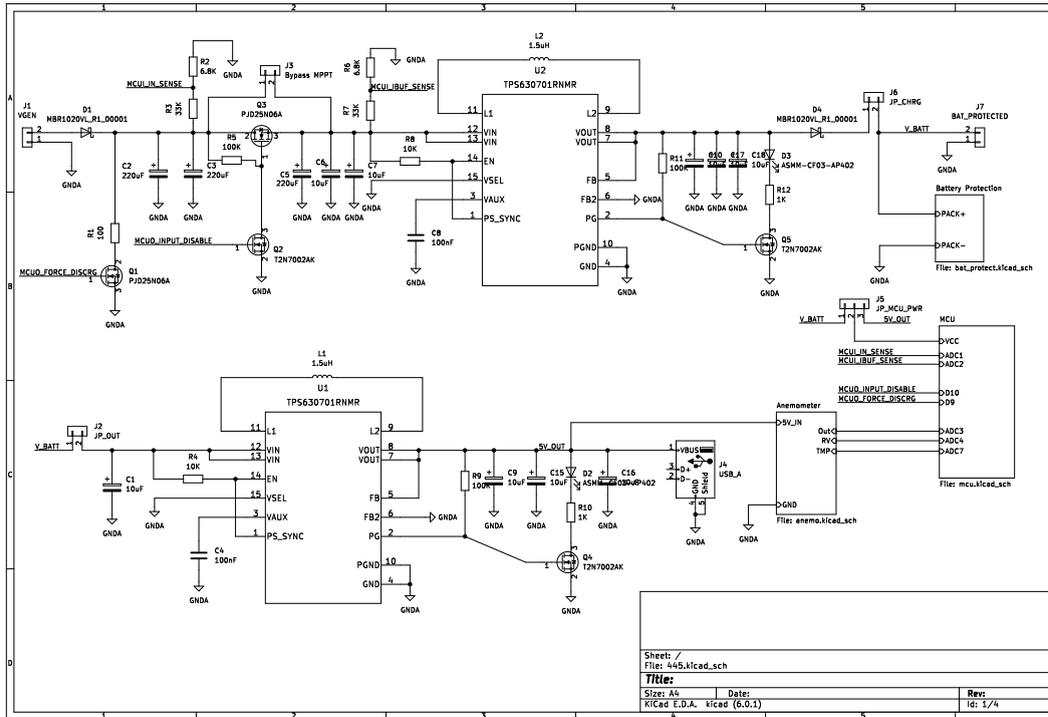
Tabla 7: Lista de componentes (Continuación)

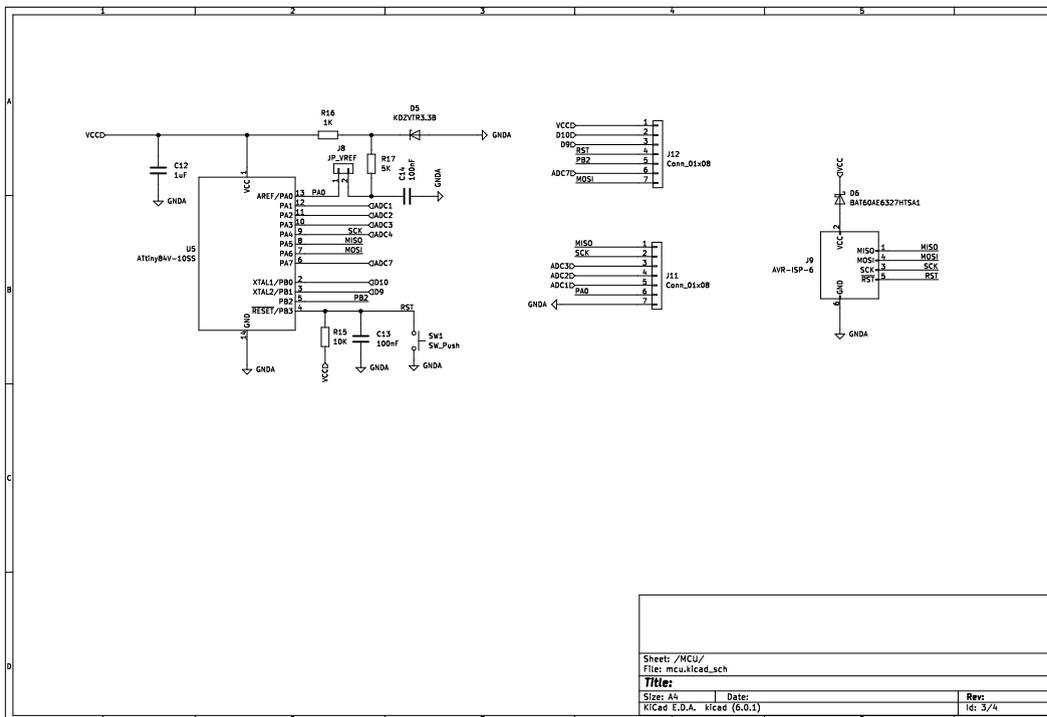
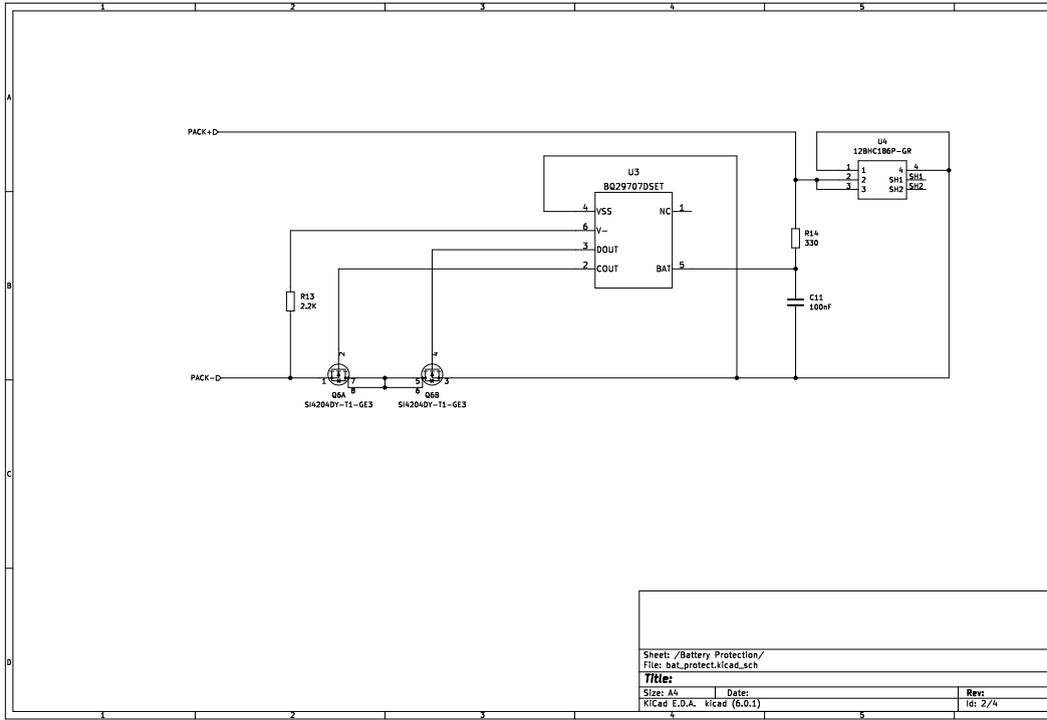
Referencia	Cantidad	Valor	Nombre	Descripción
J7	1	BAT_PROTECTED	Conn_01x02	Generic connector, single row, 01x02
J8	1	JP_VREF	Conn_01x02	Generic connector, single row, 01x02
J9	1	AVRISP6	AVRISP6	Atmel 6pin ISP connector
J10	1		Conn_01x05	Generic connector, single row, 01x05
J11, J12	2	Conn_01x07	Conn_01x07	Generic connector, single row, 01x07
L1, L2	2	1.5uH		Inductor
Q1, Q3	2	PJD25N06A	Q_NMOS_GDS	NMOSFET transistor
Q2, Q4, Q5	3	T2N7002AK	Q_NMOS_GSD	NMOSFET transistor
Q6		1	SI4204DYT1GE3	Package_SO:SOIC-8_3.9x4.9mm_P1.27mm
R1	1	100	R	Resistor
R2, R6	2	6.8K	R	Resistor
R3, R7, R18, R20, R22	5	33K	R	Resistor
R4, R8, R15	3	10K	R	Resistor
R5, R9, R11	3	100K	R	Resistor
R10, R12, R16	3	1K	R	Resistor
R13	1	2.2K	R	Resistor
R14	1	330	R	Resistor

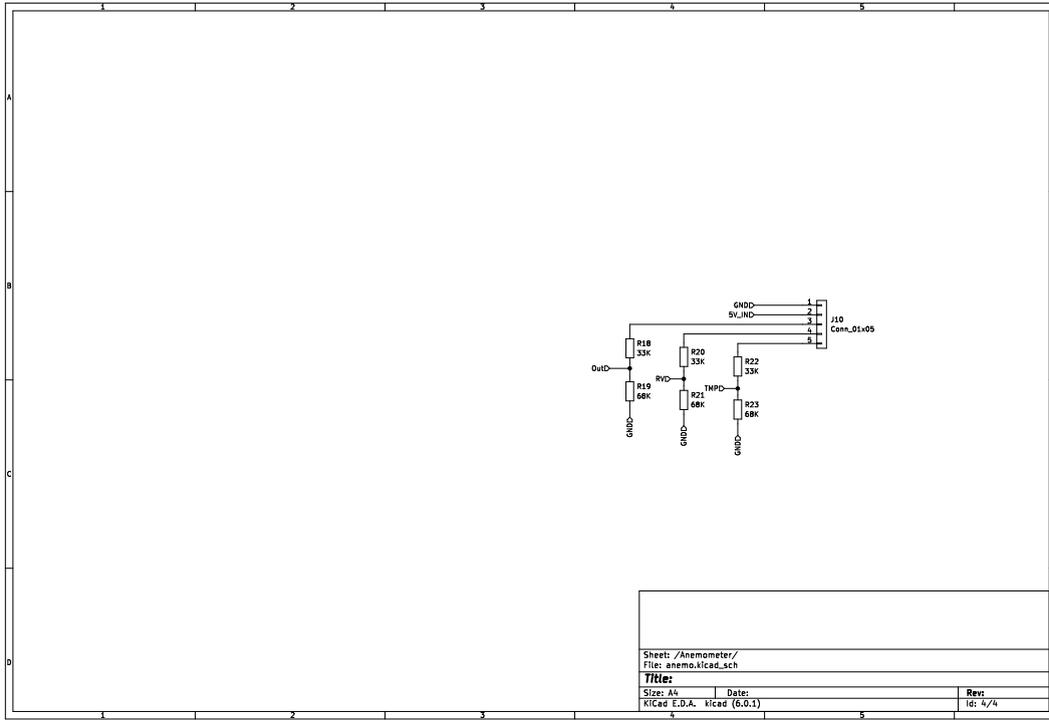
Tabla 7: Lista de componentes (Continuación)

Referencia	Cantidad	Valor	Nombre	Descripción
R17	1	5K	R	Resistor
R19	3	68K	R	Resistor
SW1	1	SW_Push	SW_Push	Push button switch, generic, two pins
U1, U2	2	TPS630701RNMR	TPS630701RNMR	
U3	1	BQ29707DSET	BQ29702DSET	
U4	1	12BHC186PGR	12BHC186PGR	Cylindrical Battery Contacts, Clips, Holders & Springs 2X18650 PARALLEL CONNECTION
U5	1	ATtiny84V10SS	ATtiny84V10P	10MHz, 8kB Flash, 512B SRAM, 512B EEPROM, debugWI-RE, DIP14

Apéndice B Esquemas completos del sistema







Apéndice C Datos de ensayo para los reguladores

C.1 Regulador de entrada

Tabla 8: Datos de ensayo para el regulador de entrada

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
3.004	0.006	0.0180	5.0319	0	0	0
3.003	0.03	0.0900	4.8768	0.0075	0.0365	0.4059
3	0.077	0.231	4.8498	0.0289	0.1401	0.6067
3.001	0.123	0.3691	4.8378	0.0494	0.2389	0.6474
3.001	0.236	0.7082	4.8097	0.099	0.4761	0.6723
3.001	0.284	0.8522	4.793	0.1192	0.5713	0.6703
3	0.332	0.996	4.7691	0.1386	0.6609	0.6636
3.001	0.383	1.1493	4.7529	0.1592	0.7566	0.6583
3.001	0.441	1.3234	4.7481	0.1793	0.8513	0.6432
3.001	0.505	1.5155	4.7445	0.1998	0.9479	0.6255
3	0.55	1.65	4.7419	0.22	1.0432	0.6322
3	0.604	1.812	4.7394	0.2393	1.1341	0.6259
3	0.68	2.04	4.7373	0.2597	1.2302	0.6030
3	0.629	1.887	4.748	0.2789	1.3242	0.7017
3	0.651	1.953	4.7365	0.2994	1.4181	0.7261
5.999	0.002	0.0119	5.0393	0	0	0
5.999	0.013	0.0779	4.8747	0.0075	0.0365	0.4687
5.999	0.034	0.2039	4.847	0.0289	0.1400	0.6867
5.999	0.054	0.3239	4.8353	0.0495	0.2393	0.7388
5.999	0.103	0.6178	4.8196	0.0991	0.4776	0.7729
5.999	0.124	0.7438	4.8135	0.1193	0.5742	0.7719

Tabla 8: Datos de ensayo para el regulador de entrada
(Continuación)

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
5.999	0.14	0.8398	4.8054	0.1386	0.6660	0.7930
5.999	0.161	0.9658	4.8003	0.1591	0.7637	0.7907
5.999	0.182	1.0918	4.7923	0.1794	0.8597	0.7874
5.999	0.199	1.1938	4.7727	0.1997	0.9531	0.7983
5.999	0.22	1.3197	4.7465	0.2199	1.0437	0.7908
5.999	0.24	1.4397	4.7369	0.2393	1.1335	0.7873
5.999	0.262	1.5717	4.7335	0.2596	1.2288	0.7818
5.999	0.283	1.6977	4.7295	0.2789	1.3190	0.7769
5.999	0.291	1.7457	4.7471	0.2993	1.4208	0.8138
8.998	0.002	0.0179	5.0463	0	0	0
8.998	0.009	0.0809	4.8683	0.0074	0.0360	0.4448
8.998	0.022	0.1979	4.8401	0.029	0.1403	0.7090
8.998	0.036	0.3239	4.8252	0.0494	0.2383	0.7358
8.998	0.068	0.6118	4.8069	0.0991	0.4763	0.7785
8.998	0.081	0.7288	4.8024	0.1193	0.5729	0.7860
8.998	0.094	0.8458	4.7975	0.1387	0.6654	0.7867
8.998	0.107	0.9627	4.7911	0.159	0.7617	0.7912
8.998	0.12	1.0797	4.7771	0.1794	0.8570	0.7937
8.998	0.132	1.1877	4.75	0.1996	0.9481	0.7982
8.998	0.146	1.3137	4.724	0.22	1.0392	0.7911
8.999	0.158	1.4218	4.724	0.24	1.1337	0.7973
8.999	0.172	1.5478	4.725	0.26	1.2285	0.7936
8.999	0.184	1.6558	4.726	0.28	1.3232	0.7991

Tabla 8: Datos de ensayo para el regulador de entrada
(Continuación)

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
8.999	0.197	1.7728	4.728	0.3	1.4184	0.8000
12	0.001	0.012	5.0831	0	0	0
12	0.007	0.084	4.8689	0.0075	0.0365	0.4347
12	0.017	0.204	4.8457	0.0293	0.1419	0.6959
12	0.028	0.336	4.8343	0.0496	0.2397	0.7136
12	0.053	0.636	4.8193	0.0994	0.4790	0.7532
12.001	0.063	0.7560	4.8164	0.119	0.5731	0.7580
12	0.072	0.864	4.814	0.1386	0.6672	0.7722
12	0.083	0.996	4.8115	0.1584	0.7621	0.7652
12	0.093	1.116	4.8082	0.1799	0.8649	0.7750
12	0.103	1.236	4.8051	0.1995	0.9586	0.7755
12	0.113	1.356	4.8016	0.22	1.0563	0.7790
12	0.123	1.476	4.7972	0.2386	1.1446	0.7754
12	0.132	1.584	4.7903	0.2594	1.2426	0.7844
12	0.142	1.704	4.7807	0.279	1.3338	0.7827
12	0.151	1.812	4.7573	0.2994	1.4243	0.7860
13.999	0.001	0.0139	5.1028	0	0	0
13.999	0.006	0.0839	4.8719	0.0072	0.0350	0.4176
13.999	0.015	0.2099	4.8487	0.029	0.1406	0.6696
13.999	0.024	0.3359	4.8368	0.0492	0.2379	0.7082
13.999	0.046	0.6439	4.8234	0.0986	0.4755	0.7385
13.999	0.055	0.7699	4.8208	0.119	0.5736	0.7450
13.999	0.063	0.8819	4.8192	0.1387	0.6684	0.7579

Tabla 8: Datos de ensayo para el regulador de entrada
(Continuación)

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
13.999	0.072	1.0079	4.8179	0.1592	0.7670	0.7609
13.999	0.081	1.1339	4.8162	0.1797	0.8654	0.7632
13.999	0.09	1.2599	4.814	0.1994	0.9599	0.7618
13.999	0.098	1.3719	4.8108	0.2194	1.0554	0.7693
13.998	0.107	1.4977	4.8084	0.2394	1.1511	0.7685
13.999	0.116	1.6238	4.805	0.2592	1.2454	0.7669
13.998	0.124	1.7357	4.8023	0.2793	1.3412	0.7727
13.998	0.133	1.8617	4.7977	0.2994	1.4364	0.7715
16	0.001	0.016	5.1158	0	0	0
16	0.005	0.08	4.8736	0.0077	0.0375	0.4690
16	0.014	0.224	4.8513	0.0286	0.1387	0.6194
16	0.022	0.352	4.8401	0.0491	0.2376	0.6751
16	0.041	0.656	4.8259	0.0986	0.4758	0.7253
16	0.049	0.784	4.8243	0.1195	0.5765	0.7353
16	0.056	0.896	4.823	0.1382	0.6665	0.7439
16	0.064	1.024	4.8225	0.1592	0.7677	0.7497
16	0.072	1.152	4.8218	0.1795	0.8655	0.7513
16	0.08	1.28	4.8206	0.1993	0.9607	0.7505
16	0.088	1.408	4.819	0.2203	1.0616	0.7539
16	0.095	1.52	4.8173	0.2396	1.1542	0.7593
16	0.103	1.648	4.815	0.2601	1.2523	0.7599
16	0.111	1.776	4.8128	0.2788	1.3418	0.7555
16	0.118	1.888	4.8102	0.2992	1.4392	0.7622

C.2 Regulador de salida

Tabla 9: Datos de ensayo para el regulador de salida

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
3.702	0.004	0.0148	5.0445	0	0	0
3.702	0.023	0.0851	5.048	0.0071	0.0358	0.4209
3.702	0.061	0.2258	5.0438	0.029	0.1462	0.6477
3.702	0.098	0.3627	5.0368	0.0494	0.2488	0.6858
3.702	0.184	0.6811	5.0263	0.0995	0.5001	0.7342
3.702	0.269	0.9958	5.0116	0.1492	0.7477	0.7508
3.702	0.355	1.3142	4.975	0.1995	0.9925	0.7552
3.702	0.444	1.6436	4.9628	0.2493	1.2372	0.7527
3.702	0.529	1.9583	4.9523	0.2993	1.4822	0.7568
3.702	0.642	2.3766	4.9333	0.3496	1.7246	0.7256
3.702	0.602	2.2286	4.9379	0.3987	1.9687	0.8833
3.702	0.689	2.5506	4.9296	0.4488	2.2124	0.8673
3.702	0.775	2.8690	4.9227	0.5004	2.4633	0.8585
3.702	0.861	3.1874	4.9157	0.5502	2.7046	0.8485
3.702	0.947	3.5057	4.9091	0.5999	2.9449	0.8400
3.702	1.035	3.8315	4.9028	0.6497	3.1853	0.8313
3.702	1.123	4.1573	4.8962	0.7004	3.4292	0.8248
3.702	1.217	4.5053	4.89	0.7501	3.6679	0.8141
3.702	1.311	4.8533	4.8839	0.8	3.9071	0.8050
3.702	1.408	5.2124	4.8774	0.8496	4.1438	0.7949
3.702	1.51	5.5900	4.8714	0.8997	4.3827	0.7840
3.702	1.613	5.9713	4.8657	0.9504	4.6243	0.7744
3.702	1.72	6.3674	4.8604	0.9995	4.8579	0.7629

Tabla 9: Datos de ensayo para el regulador de salida
(Continuación)

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
3.802	0.004	0.0152	5.0441	0	0	0
3.802	0.023	0.0874	5.0477	0.0071	0.0358	0.4098
3.802	0.06	0.2281	5.0439	0.029	0.1462	0.6412
3.802	0.095	0.3611	5.037	0.0493	0.2483	0.6875
3.802	0.178	0.6767	5.0269	0.0994	0.4996	0.7383
3.802	0.26	0.9885	5.0135	0.149	0.7470	0.7556
3.802	0.343	1.3040	4.9763	0.1993	0.9917	0.7605
3.802	0.429	1.6310	4.9589	0.2498	1.2387	0.7594
3.802	0.511	1.9428	4.9532	0.2992	1.4819	0.7628
3.802	0.61	2.3192	4.9331	0.3497	1.7251	0.7438
3.802	0.585	2.2241	4.9225	0.3992	1.9650	0.8835
3.802	0.669	2.5435	4.9296	0.4493	2.2148	0.8707
3.802	0.75	2.8515	4.923	0.5006	2.4644	0.8642
3.802	0.833	3.1670	4.9156	0.55	2.7035	0.8536
3.802	0.915	3.4788	4.9091	0.6003	2.9469	0.8471
3.802	0.998	3.7943	4.9026	0.6495	3.1842	0.8391
3.802	1.083	4.1175	4.8963	0.7001	3.4278	0.8325
3.802	1.171	4.4521	4.8895	0.75	3.6671	0.8236
3.802	1.258	4.7829	4.8835	0.8	3.9068	0.8168
3.802	1.352	5.1403	4.8772	0.85	4.1456	0.8064
3.802	1.447	5.5014	4.871	0.9002	4.3848	0.7970
3.802	1.545	5.8740	4.8646	0.9505	4.6238	0.7871
3.802	1.643	6.2466	4.8591	1.0001	4.8595	0.7779

Tabla 9: Datos de ensayo para el regulador de salida
(Continuación)

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
4.002	0.004	0.0160	5.0441	0	0	0
4.002	0.022	0.0880	5.0473	0.0077	0.0388	0.4414
4.002	0.056	0.2241	5.0462	0.0291	0.1468	0.6552
4.002	0.09	0.3601	5.0389	0.0499	0.2514	0.6980
4.002	0.169	0.6763	5.0298	0.0986	0.4959	0.7332
4.002	0.245	0.9804	5.0172	0.1497	0.7510	0.7660
4.002	0.323	1.2926	4.9933	0.1995	0.9961	0.7706
4.002	0.403	1.6128	4.955	0.25	1.2387	0.7680
4.002	0.479	1.9169	4.946	0.2993	1.4803	0.7722
4.002	0.563	2.2531	4.9321	0.3496	1.7242	0.7652
4.002	0.666	2.6653	4.9258	0.3986	1.9634	0.7366
4.002	0.622	2.4892	4.9299	0.4496	2.2164	0.8904
4.002	0.702	2.8094	4.9225	0.5001	2.4617	0.8762
4.002	0.779	3.1175	4.9158	0.5502	2.7046	0.8675
4.002	0.855	3.4217	4.9088	0.6005	2.9477	0.8614
4.002	0.932	3.7298	4.9025	0.6495	3.1841	0.8536
4.002	1.01	4.0420	4.8959	0.6998	3.4261	0.8476
4.002	1.09	4.3621	4.8895	0.7503	3.6685	0.8409
4.002	1.171	4.6863	4.8826	0.7999	3.9055	0.8333
4.002	1.255	5.0225	4.8765	0.8499	4.1445	0.8251
4.002	1.34	5.3626	4.8697	0.9005	4.3851	0.8177
4.002	1.428	5.7148	4.8635	0.9503	4.6217	0.8087
4.002	1.517	6.0710	4.8574	0.9995	4.8549	0.7996

Tabla 9: Datos de ensayo para el regulador de salida
(Continuación)

Entrada V(V)	Entrada I(A)	Entrada P(W)	Salida V(V)	Salida I(A)	Salida P(W)	Eficiencia
4.202	0.004	0.0168	5.0438	0	0	0
4.202	0.02	0.0840	5.0475	0.0073	0.0368	0.4384
4.202	0.053	0.2227	5.048	0.0291	0.1468	0.6595
4.202	0.085	0.3571	5.0412	0.0487	0.2455	0.6873
4.202	0.16	0.6723	5.0321	0.0995	0.5006	0.7447
4.202	0.234	0.9832	5.0202	0.1495	0.7505	0.7632
4.202	0.306	1.2858	5.0025	0.1992	0.9964	0.7749
4.202	0.379	1.5925	4.9469	0.2501	1.2372	0.7768
4.202	0.453	1.9035	4.9414	0.2991	1.4779	0.7764
4.202	0.531	2.2312	4.9309	0.35	1.7258	0.7734
4.202	0.614	2.5800	4.9253	0.3995	1.9676	0.7626
4.202	0.587	2.4665	4.9304	0.4494	2.2157	0.8982
4.202	0.679	2.8531	4.9205	0.4996	2.4582	0.8616
4.202	0.748	3.1430	4.9144	0.5505	2.7053	0.8607
4.202	0.823	3.4582	4.907	0.6003	2.9456	0.8517
4.202	0.894	3.7565	4.9004	0.6494	3.1823	0.8471
4.202	0.973	4.0885	4.8933	0.7003	3.4267	0.8381
4.202	1.049	4.4078	4.8863	0.7505	3.6671	0.8319
4.202	1.123	4.7188	4.8803	0.7995	3.9017	0.8268
4.202	1.206	5.0676	4.8733	0.8499	4.1418	0.8173
4.202	1.278	5.3701	4.8677	0.9007	4.3843	0.8164
4.202	1.365	5.7357	4.8608	0.9504	4.6197	0.8054
4.202	1.442	6.0592	4.855	0.9995	4.8525	0.8008

Apéndice D Código del microcontrolador

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include "tinysnore.h"

#define MCU_IN_DISABLE_PIN 10
#define MCUI_IBUF_SENSE A2
#define MCUO_FORCE_DISCRG 9
#define analogPinForRV A4
#define analogPinForTMP A7
#define analogPinForOUT A3
#define MCUI_IN_SENSE A1

#define DEBUG
#define USE_ANEMOMETER

#define rxPin 6
#define txPin 5
// analogPinForOrigVolt is the MCU_IN_SENSE

const float zeroWindAdjustment = 0.44;

float R2 = 6800.0;
float R3 = 33000.0;
float best_voltage;
float orig_volt;
float orig_IBUF_volt;
uint32_t lastMillis = 0;
int16_t TMP_Therm_ADunits; // temp termistor value from wind sensor
int16_t RV_Wind_ADunits; // RV output from wind sensor
float RV_Wind_Volts;
// int TempCtimes100;
double zeroWind_ADunits;
double zeroWind_volts;
float WindSpeed_MPH;
float OUT;
int16_t OUT_unit;

#ifdef DEBUG
SoftwareSerial mySerial = SoftwareSerial(rxPin, txPin);
#endif

void setup()
```

```
{
  // put your setup code here, to run once:
#ifdef DEBUG
  mySerial.begin(57600);
  mySerial.println("B");
#endif
  pinMode(MCUI_IN_SENSE, INPUT);
  pinMode(MCUI_IBUF_SENSE, INPUT);
  pinMode(analogPinForRV, INPUT);
  pinMode(analogPinForTMP, INPUT);
  pinMode(analogPinForOUT, INPUT);
  pinMode(MCU_IN_DISABLE_PIN, OUTPUT);
  pinMode(MCUO_FORCE_DISCRG, OUTPUT);

  pinMode(rxPin, INPUT);
  pinMode(txPin, OUTPUT);
}

void loop()
{
#ifdef DEBUG
  mySerial.println("S:");
#endif

  int16_t in_sense_raw = analogRead(MCUI_IN_SENSE);
  int16_t mcui_ibuf_sense_raw = analogRead(MCUI_IBUF_SENSE);
  orig_volt = in_sense_raw * 5.0 / 1023.0 * (R2 + R3) / R2;
  orig_IBUF_volt = mcui_ibuf_sense_raw * 5.0 / 1023.0 * (R2 + R3) /
  R2;

#ifdef USE_ANEMOMETER
  // Units for anemometer
  TMP_Therm_ADunits = analogRead(analogPinForTMP);
  RV_Wind_ADunits = analogRead(analogPinForRV);
  OUT_unit = analogRead(analogPinForOUT);

#ifdef DEBUG
  mySerial.print("I_V_R:");
  mySerial.println(in_sense_raw);
#endif
  RV_Wind_Volts = (RV_Wind_ADunits * 0.0048828125);
  OUT = (OUT_unit * 0.0048828125);

  // Calculating windspeed

```

```
// TempCtimes100 = (0.005 * ((float)TMP_Therm_ADunits *
    (float)TMP_Therm_ADunits)) - (16.862 * (float)TMP_Therm_ADunits)
    + 9075.4;
zeroWind_ADunits = -0.0006 * ((float)TMP_Therm_ADunits *
    (float)TMP_Therm_ADunits) + 1.0727 * (float)TMP_Therm_ADunits +
    47.172; // 13.0C 553 482.39
zeroWind_volts = (zeroWind_ADunits * 0.0048828125) -
    zeroWindAdjustment;
WindSpeed_MPH = pow(((RV_Wind_Volts - zeroWind_volts) / .2300),
    2.7265);

if (OUT > 1.775)
{
    best_voltage = 2.3481 * OUT + 8.0752;
}
else
{
    best_voltage = 8.9693 * OUT + 1.775;
}
#else
    best_voltage = 12.0;
#endif

if(best_voltage <= 6) {
    best_voltage = 6.0;
}
// MCU logic
if (orig_volt >= 16)
{
    digitalWrite(MCUO_FORCE_DISCRG, HIGH);
    digitalWrite(MCU_IN_DISABLE_PIN, LOW);
#ifdef DEBUG
    mySerial.println("C-1");
#endif
}
else
{
    if (orig_IBUF_volt > orig_volt)
    {
#ifdef DEBUG
        mySerial.println("C-2");
#endif
    }
    digitalWrite(MCUO_FORCE_DISCRG, LOW);
    digitalWrite(MCU_IN_DISABLE_PIN, LOW);
}
}
```

```
else
{
    if (orig_volt > best_voltage)
    {
#ifdef DEBUG
        mySerial.println("C-3");
#endif

        digitalWrite(MCUO_FORCE_DISCRG, LOW);
        digitalWrite(MCU_IN_DISABLE_PIN, LOW);
    }
    else
    {
#ifdef DEBUG
        mySerial.println("C-4");
#endif

        digitalWrite(MCUO_FORCE_DISCRG, LOW);
        digitalWrite(MCU_IN_DISABLE_PIN, HIGH);
    }
}
}

#ifdef DEBUG
    String prompt = "Anemo:";
    prompt.concat(OUT);
    mySerial.println(prompt);

    prompt = "Best V:";
    prompt.concat(best_voltage);
    mySerial.println(prompt);

    prompt = "In V:";
    prompt.concat(orig_volt);
    mySerial.println(prompt);
#endif

    snore(1000);
}
```

Apéndice E Datos medidos para el algoritmo MPPT

La Tabla 10 muestra los ensayos realizados a una velocidad de viento medida de 10.2134MPH, la tensión de salida del anemómetro es de 2.07534V

Tabla 10: Velocidad del ventilador 2, Distancia 5cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.017	0.157	0.153
9.5	0.018	0.175	0.171
10	0.0182	0.189	0.182
10.5	0.0185	0.2	0.19425
11	0.0215	0.235	0.2365
11.5	0.0195	0.225	0.22425
12	0.0187	0.223	0.2244
12.5	0.0167	0.21	0.20875
13	0.0153	0.193	0.1989
13.5	0.0125	0.175	0.16875

La Tabla 11 muestra los ensayos realizados a una velocidad de viento medida de 7,7439MPH, la tensión de salida del anemómetro es de 1,99023V.

Tabla 11: Velocidad del ventilador 2, Distancia 10cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.0113	0.106	0.1017
9.5	0.0115	0.11	0.10925
10	0.012	0.117	0.12
10.5	0.0102	0.108	0.1071
11	0.0179	0.175	0.1969
11.5	0.0144	0.177	0.1656
12	0.0128	0.164	0.1536
12.5	0.0119	0.144	0.14875
13	0.0101	0.128	0.1313
13.5	0.0087	0.114	0.11745

La Tabla 12 muestra las pruebas realizadas a una velocidad de viento medida de 5,8437MPH, la tensión de salida del anemómetro es de 1,7737V

Tabla 12: Velocidad del ventilador 2, Distancia 15cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.0101	0.087	0.0909
9.5	0.0095	0.087	0.09025
10	0.0086	0.085	0.086
10.5	0.079	0.081	0.8295
11	0.0067	0.079	0.0737
11.5	0.0057	0.064	0.06555
12	0.0039	0.045	0.0468
12.5	0.0028	0.03	0.035
13	0.001	0.013	0.013

La Tabla 13 muestra las pruebas realizadas a una velocidad de viento medida de

3,92417MPH, la tensión de salida del anemómetro es de 1,55833V

Tabla 13: Velocidad del ventilador 2, Distancia 20cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.0124	0.105	0.1116
9.5	0.0113	0.108	0.10735
10	0.011	0.105	0.11
10.5	0.0098	0.102	0.1029
11	0.085	0.096	0.935
11.5	0.0063	0.078	0.07245
12	0.0049	0.068	0.0588
12.5	0.0044	0.053	0.055
13	0.0031	0.039	0.0403
13.5	0.0012	0.014	0.0162

La Tabla 14 muestra las pruebas realizadas a una velocidad de viento medida de 10,835MPH, la tensión de salida del anemómetro es de 2,110833V.

Tabla 14: Velocidad del ventilador 3, Distancia 5cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.0374	0.332	0.3366
9.5	0.0371	0.364	0.35245
10	0.0361	0.363	0.361
10.5	0.0376	0.399	0.3948
11	0.0343	0.373	0.3773
11.5	0.0331	0.378	0.38065
12	0.0317	0.389	0.3804
12.5	0.0302	0.378	0.3775
13	0.0284	0.368	0.3692
13.5	0.0277	0.372	0.37395

La Tabla 15 muestra las pruebas realizadas a una velocidad de viento medida de 11.429MPH, el voltaje de salida del anemómetro es de 2.151V

Tabla 15: Velocidad del ventilador 3, Distancia 10cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.0371	0.33	0.3339
9.5	0.0355	0.338	0.33725
10	0.0379	0.371	0.379
10.5	0.0374	0.397	0.3927
11	0.0336	0.37	0.3696
11.5	0.0339	0.387	0.38985
12	0.0307	0.377	0.3684
12.5	0.0303	0.371	0.37875
13	0.0266	0.357	0.3458
13.5	0.025	0.339	0.3375

La Tabla 16 muestra las pruebas realizadas a una velocidad de viento medida de 7,485MPH, la tensión de salida del anemómetro es de 1,990833V

Tabla 16: Velocidad del ventilador 3, Distancia 15cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.0385	0.353	0.3465
9.5	0.0387	0.375	0.36765
10	0.0374	0.375	0.374
10.5	0.0373	0.392	0.39165
11	0.0329	0.363	0.3619
11.5	0.0299	0.34	0.34385
12	0.0276	0.337	0.3312
12.5	0.027	0.342	0.3375
13	0.0248	0.338	0.3224
13.5	0.0225	0.315	0.30375

La Tabla 17 muestra las pruebas realizadas a una velocidad de viento medida de 10,88083MPH, la tensión de salida del anemómetro es de 2,035V

Tabla 17: Velocidad del ventilador 3, Distancia 20cm

Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Potencia calculada
9	0.0354	0.303	0.3186
9.5	0.0339	0.326	0.32205
10	0.0335	0.33	0.335
10.5	0.0329	0.345	0.34545
11	0.0332	0.372	0.3652
11.5	0.0309	0.355	0.35535
12	0.029	0.347	0.348
12.5	0.0283	0.351	0.35375
13	0.0259	0.336	0.3367
13.5	0.0242	0.32	0.3267

La Tabla 18 muestra el resultado final del MPPT.

Tabla 18: Resultado final del MPPT

Tensión del anemómetro (V)	Tensión óptima (V)
1.55833	9.5
1.7737	9.5
1.99023	11.5
1.990833	10.5
2.035	11
2.07534	11
2.110833	12
2.151	11.5

Apéndice F Código de las simulaciones

F.1 Simulación con MPPT. Figura 12

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math

simulated_time = 0
max_time = 4000

# Motor stuff.
motor_voltage = 0
motor_max_voltage = 24
motor_current_drawn = 0
friction_force = 1
motor_current_drawing = False
motor_load_r = 0.2

# MPPT Stuff
motor_best_voltage = 12
mppt_period = 200

# Results
time = []
motor_v = []
motor_current = []
motor_p = []
input_enable = []
total_power = []

sum_power = 0

while(simulated_time < max_time):
    time.append(simulated_time)

    # Motor calculation
    wind_force = (motor_max_voltage - motor_voltage)
    current_force = motor_current_drawn
    net_force = wind_force - current_force - friction_force
    motor_voltage += net_force / 1000
```

```
motor_v.append(motor_voltage)

# MPPT
if(simulated_time % mppt_period == 0):
    if(motor_voltage > motor_best_voltage):
        motor_current_drawing = True
    else:
        motor_current_drawing = False

if motor_current_drawing:
    motor_current_drawn = motor_voltage / motor_load_r
else:
    motor_current_drawn = 0

input_enable.append(motor_current_drawing)
motor_current.append(motor_current_drawn)
motor_p.append(motor_voltage * motor_current_drawn)
sum_power += motor_voltage * motor_current_drawn
total_power.append(sum_power)
simulated_time += 1

sim_plot = plt.figure(figsize=(16,16))
axs = sim_plot.subplots(5, 1, sharex=True)

axs[0].plot(time,motor_v, label="Motor Voltage (V)")
axs[0].set_ylabel("Motor Voltage")
axs[0].grid()

axs[1].plot(time,motor_current, color="orange")
axs[1].set_ylabel("Motor Output Current (mA)")
axs[1].grid()

axs[2].plot(time,input_enable, color="green")
axs[2].set_ylabel("Input ON/OFF")
axs[2].grid()

axs[3].plot(time,motor_p, color="red")
axs[3].set_ylabel("Power (mW)")
axs[3].grid()

axs[4].plot(time,total_power, color="magenta")
axs[4].set_xlabel("Simulated Time")
axs[4].set_ylabel("Energy (mJ)")
axs[4].text(0, 300000, f"Total Power Gained: {sum_power} mJ")
axs[4].grid()
```

```
axs[0].set_title("Simulated Operation, MPPT Enabled")  
sim_plot.show()
```

F.2 Simulación sin MPPT. Figura 13

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math

simulated_time = 0
max_time = 4000

# Motor stuff.
motor_voltage = 0
motor_max_voltage = 24
motor_current_drawn = 0
friction_force = 1
motor_current_drawing = False
motor_load_r = 0.2

# MPPT Stuff
motor_best_voltage = 12
mppt_period = 200

# Results
time = []
motor_v = []
motor_current = []
motor_p = []
input_enable = []
total_power = []

sum_power = 0

while(simulated_time < max_time):
    time.append(simulated_time)

    # Motor calculation
    wind_force = (motor_max_voltage - motor_voltage)
    current_force = motor_current_drawn
    net_force = wind_force - current_force - friction_force
    motor_voltage += net_force / 1000

    motor_v.append(motor_voltage)
```

```
# MPPT
motor_current_drawing = True

if motor_current_drawing:
    motor_current_drawn = motor_voltage / motor_load_r
else:
    motor_current_drawn = 0

input_enable.append(motor_current_drawing)
motor_current.append(motor_current_drawn)
motor_p.append(motor_voltage * motor_current_drawn)
sum_power += motor_voltage * motor_current_drawn
total_power.append(sum_power)
simulated_time += 1

sim_plot = plt.figure(figsize=(16,16))
axs = sim_plot.subplots(5, 1, sharex=True)

axs[0].plot(time,motor_v, label="Motor Voltage (V)")
axs[0].set_ylabel("Motor Voltage")
axs[0].grid()

axs[1].plot(time,motor_current, color="orange")
axs[1].set_ylabel("Motor Output Current (mA)")
axs[1].grid()

axs[2].plot(time,input_enable, color="green")
axs[2].set_ylabel("Input ON/OFF")
axs[2].grid()

axs[3].plot(time,motor_p, color="red")
axs[3].set_ylabel("Power (mW)")
axs[3].grid()

axs[4].plot(time,total_power, color="magenta")
axs[4].set_xlabel("Simulated Time")
axs[4].set_ylabel("Energy (mJ)")
axs[4].grid()
axs[4].text(0, 200000, f"Total Power Gained: {sum_power} mJ")

axs[0].set_title("Simulated Operation, MPPT Disabled")
sim_plot.show()
```

F.3 Caída de tensión del regulador de entrada. Figura 16

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math
import os

input_reg_data = pd.read_csv(os.getcwd() + "/Ver3_input.csv")
input_reg_data = input_reg_data.dropna()

data_dict = set()

for row in input_reg_data.iterrows():
    rounded_input_v = round(row[1]["Input V"],1)
    data_dict.add(rounded_input_v)

drop_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
# efficiency_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
drop_graph_axes = drop_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8, 0.8])
# efficiency_graph_axes = efficiency_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8,
0.8])

for v in data_dict:
    related = input_reg_data[lambda x: round(x["Input V"],1) == v]
    output_current = related["Output I"].to_numpy()
    output_voltage = related["Output V"].to_numpy()

    X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, output_voltage)
    X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
500)
    Y_ = X_Y_Spline(X_)
    drop_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

    # efficiency = related["Efficiency"]
    # X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, efficiency)
    # X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
500)
    # Y_ = X_Y_Spline(X_)
    # efficiency_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

drop_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
drop_graph_axes.set_ylabel("Output Voltage (V)")
```

```
drop_graph_axes.set_title("Input Regulator  $I_{out}$  v.s.  $V_{out}$ ")
drop_graph_axes.legend()
drop_graph_axes.grid()
drop_graph.show()

# efficiency_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
# efficiency_graph_axes.set_ylabel("Efficiency")
# efficiency_graph_axes.set_title("Input Regulator  $I_{out}$  v.s.
# Efficiency")
# efficiency_graph_axes.legend()
# efficiency_graph_axes.grid()
# efficiency_graph.show()
```

F.4 Eficiencia del regulador de entrada. Figura 17

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math
import os

input_reg_data = pd.read_csv(os.getcwd() + "/Ver3_input.csv")
input_reg_data = input_reg_data.dropna()

data_dict = set()

for row in input_reg_data.iterrows():
    rounded_input_v = round(row[1]["Input V"],1)
    data_dict.add(rounded_input_v)

# drop_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
efficiency_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
# drop_graph_axes = drop_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8, 0.8])
efficiency_graph_axes = efficiency_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8, 0.8])

for v in data_dict:
    related = input_reg_data[lambda x: round(x["Input V"],1) == v]
    output_current = related["Output I"].to_numpy()
    output_voltage = related["Output V"].to_numpy()

    # X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, output_voltage)
    # X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
    #                   500)
    # Y_ = X_Y_Spline(X_)
    # drop_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

    efficiency = related["Efficiency"]
    X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, efficiency)
    X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
                    500)
    Y_ = X_Y_Spline(X_)
    efficiency_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

# drop_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
# drop_graph_axes.set_ylabel("Output Voltage (V)")
# drop_graph_axes.set_title("Input Regulator $I_{out}$ v.s. $V_{out}$")
```

```
# drop_graph_axes.legend()
# drop_graph_axes.grid()
# drop_graph.show()

efficiency_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
efficiency_graph_axes.set_ylabel("Efficiency")
efficiency_graph_axes.set_title("Input Regulator  $I_{out}$  v.s.
Efficiency")
efficiency_graph_axes.legend()
efficiency_graph_axes.grid()
efficiency_graph.show()
```

F.5 Rizado del regulador de entrada. Figura 18

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math
import os

ripple_in = []

with open(os.getcwd() + "/RefCurve_2022-05-01_0__023359.Wfm.csv", "r")
    as csv_ripple_in:
    plots = csv.reader(csv_ripple_in, delimiter = ',')

    for row in plots:
        ripple_in.append(float(row[0]))

x_start = 0.04678
x_stop = 0.04682

ripple_in_y = np.array(ripple_in)
ripple_in_x = np.linspace(x_start, x_stop, len(ripple_in))

v_avg = np.mean(ripple_in_y)

ripple_in = plt.figure(figsize=(16,9))
ripple_in_axes = ripple_in.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
ripple_in_axes.set_ylim((3,5.5))

y_ticks = np.linspace(3.0, 5.5, int((5.5-3.0) // 0.5) + 1)
#ripple_in_axes.set_xlim([0.046780, 0.046795])
ripple_in_axes.plot(ripple_in_x, ripple_in_y, linewidth=0.2, label =
    "Output Voltage")
ripple_in_axes.plot([x_start-0.000001, x_stop+0.000001], [v_avg,
    v_avg], linewidth=3, label = "Mean")
ripple_in_axes.grid(True, 'both', 'both')
ripple_in_axes.set_yticks(y_ticks, minor=True)
ripple_in_axes.set_ylabel("Voltage (V)")
ripple_in_axes.set_xlabel("Time (s)")
ripple_in_axes.legend()

annon = ""
annon += "$V_{out} = " + "%.3f" % v_avg + "\ V$\n"
```

```
annon += "$V_{95\%} = " + "%.3f" % np.percentile(ripple_in_y, 95) +
"\ V$\n"
annon += "$V_{5\%} = " + "%.3f" % np.percentile(ripple_in_y, 5) + "\
V$\n"
annon += "$V_{ripple}(95\%): " + (("%.3f" %
(np.percentile(ripple_in_y, 95) - np.percentile(ripple_in_y, 5))) +
"\ V$"
ripple_in_axes.text(0.04678, 3.75, annon, fontsize=15)

ripple_in_axes.set_title("Input Regulator Ripple, 12V In @ 300mA
output")
ripple_in.show()
```

F.6 Caída de tensión del regulador de salida. Figura 19

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math
import os

output_reg_data = pd.read_csv(os.getcwd() + "/Ver3_output.csv")
output_reg_data = output_reg_data.dropna()

data_dict = set()

for row in output_reg_data.iterrows():
    rounded_input_v = round(row[1]["Input V"],1)
    data_dict.add(rounded_input_v)

drop_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
# efficiency_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
drop_graph_axes = drop_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8, 0.8])
# efficiency_graph_axes = efficiency_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8,
0.8])

for v in data_dict:
    related = output_reg_data[lambda x: round(x["Input V"],1) == v]
    output_current = related["Output I"].to_numpy()
    output_voltage = related["Output V"].to_numpy()

    X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, output_voltage)
    X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
500)
    Y_ = X_Y_Spline(X_)
    drop_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

    # efficiency = related["Efficiency"]
    # X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, efficiency)
    # X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
500)
    # Y_ = X_Y_Spline(X_)
    # efficiency_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

drop_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
drop_graph_axes.set_ylabel("Output Voltage (V)")
```

```
drop_graph_axes.set_title("Output Regulator  $I_{out}$  v.s.  $V_{out}$ ")
drop_graph_axes.legend()
drop_graph_axes.grid()
drop_graph.show()

# efficiency_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
# efficiency_graph_axes.set_ylabel("Efficiency")
# efficiency_graph_axes.set_title("Output Regulator  $I_{out}$  v.s.
# Efficiency")
# efficiency_graph_axes.legend()
# efficiency_graph_axes.grid()
# efficiency_graph.show()
```

F.7 Eficiencia del regulador de salida. Figura 20

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math
import os

output_reg_data = pd.read_csv(os.getcwd() + "/Ver3_output.csv")
output_reg_data = output_reg_data.dropna()

data_dict = set()

for row in output_reg_data.iterrows():
    rounded_input_v = round(row[1]["Input V"],1)
    data_dict.add(rounded_input_v)

drop_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
# efficiency_graph = plt.figure(figsize=(16,9))
drop_graph_axes = drop_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8, 0.8])
# efficiency_graph_axes = efficiency_graph.add_axes([0.1, 0.1, 0.8,
    0.8])

for v in data_dict:
    related = output_reg_data[lambda x: round(x["Input V"],1) == v]
    output_current = related["Output I"].to_numpy()
    output_voltage = related["Output V"].to_numpy()

    X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, output_voltage)
    X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
        500)
    Y_ = X_Y_Spline(X_)
    drop_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

    # efficiency = related["Efficiency"]
    # X_Y_Spline = make_interp_spline(output_current, efficiency)
    # X_ = np.linspace(np.min(output_current), np.max(output_current),
        500)
    # Y_ = X_Y_Spline(X_)
    # efficiency_graph_axes.plot(X_, Y_, label = f"Vin = {v}V")

drop_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
drop_graph_axes.set_ylabel("Output Voltage (V)")
```

```
drop_graph_axes.set_title("Output Regulator  $I_{out}$  v.s.  $V_{out}$ ")
drop_graph_axes.legend()
drop_graph_axes.grid()
drop_graph.show()

# efficiency_graph_axes.set_xlabel("Output Current (A)")
# efficiency_graph_axes.set_ylabel("Efficiency")
# efficiency_graph_axes.set_title("Output Regulator  $I_{out}$  v.s.
# Efficiency")
# efficiency_graph_axes.legend()
# efficiency_graph_axes.grid()
# efficiency_graph.show()
```

F.8 Rizado del regulador de salida. Figura 21

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import csv
import pandas as pd
import math
import os

ripple_out = []

with open(os.getcwd() + "/RefCurve_2022-05-01_1__024151.Wfm.csv", "r")
    as csv_ripple_out:
    plots = csv.reader(csv_ripple_out, delimiter = ',')

    for row in plots:
        ripple_out.append(float(row[0]))

x_start = 0.04678
x_stop = 0.04682

ripple_out_y = np.array(ripple_out)
ripple_out_x = np.linspace(x_start, x_stop, len(ripple_out))

v_avg = np.mean(ripple_out_y)

ripple_out = plt.figure(figsize=(16,9))
ripple_out_axes = ripple_out.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
ripple_out_axes.set_ylim((3,5.5))

y_ticks = np.linspace(3.0, 5.5, int((5.5-3.0) // 0.5) + 1)
#ripple_in_axes.set_xlim([0.046780, 0.046795])
ripple_out_axes.plot(ripple_out_x, ripple_out_y, linewidth=0.2, label
    = "Output Voltage")
ripple_out_axes.plot([x_start-0.000001, x_stop+0.000001], [v_avg,
    v_avg], linewidth=3, label = "Mean")
ripple_out_axes.grid(True, 'both', 'both')
ripple_out_axes.set_yticks(y_ticks, minor=True)
ripple_out_axes.set_ylabel("Voltage (V)")
ripple_out_axes.set_xlabel("Time (s)")
ripple_out_axes.legend()

annon = ""
annon += "$V_{out} = " + "%.3f" % v_avg + "\ V$\n"
```

```
annon += "$V_{95\%} = " + "%.3f" % np.percentile(ripple_out_y, 95) +
"\ V$\n"
annon += "$V_{5\%} = " + "%.3f" % np.percentile(ripple_out_y, 5) + "\
V$\n"
annon += "$V_{ripple}(95\%): " + ( "%.3f" %
(np.percentile(ripple_out_y,95) - np.percentile(ripple_out_y,5))) +
"\ V$"
ripple_out_axes.text(0.04678, 3.75, annon, fontsize=15)

ripple_out_axes.set_title("Output Regulator Ripple, 4.2V In @ 1A
Output")
ripple_out.show()
```
