



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA,
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

CONCEPCIÓN Y REALIZACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE UNA NUEVA CAJA ACÚSTICA

Autor: Sara Bernaldo de Quirós Redondo
Director: Jean-Pierre Fanton (Ecole Centrale Paris)

Madrid
Junio 2015

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO (RESTRINGIDO) DE DOCUMENTACIÓN

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

El autor D. Sara Bernaldo de Quirós Redondo, como alumna de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA** que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra "Concepción y realización del sistema de alimentación de una nueva caja acústica" (Proyecto Fin de Grado), que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2ª. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita* (*con las limitaciones que más adelante se detallan*) por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3ª. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

- (b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .
- (c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.¹
- (d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital. ²

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

- a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).
- d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

¹ En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

² En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

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

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

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

- a) Deberes del repositorio Institucional:
 - La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
 - La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
 - La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 15 de junio de 2015

ACEPTA

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'S' followed by several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Fdo.....SARA BERNALDO DE QUIRÓS REDONDO.....

Proyecto realizado por el alumno/a:

Sara Bernaldo de Quirós Redondo

Fdo.:  Fecha: 5/6/2015

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter
confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Jean-Pierre Fanton

Fdo.:  Fecha: 5/6/2015

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fernando de Cuadra García

Fdo.: Fecha: .../.../2015

CONCEPCIÓN Y REALIZACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE UNA NUEVA CAJA ACÚSTICA

Autor: Bernaldo de Quirós Redondo, Sara.

Director: Fanton, Jean-Pierre.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

El trabajo que presenta este documento describe la concepción y realización del sistema de alimentación de la caja acústica *Boombox* de *Night Owl Acoustics* (ver figura 1). Se trata de una nueva caja acústica desarrollada y construida por un grupo de seis estudiantes de la universidad francesa *Ecole Centrale Paris*. El proyecto nace de la voluntad de compra de una caja acústica portátil inexistente en el mercado: de potencia elevada, de alta calidad sonora y de precio situado alrededor de los 400€. Así, el nuevo producto se basa en un triple compromiso: para una autonomía energética superior a 7h y un peso total de 10.3kg, la *Boombox* tiene una potencia máxima de 300W, una potencia RMS de 160W, una sensibilidad acústica de 85dB/W a un metro y una presión acústica de 110dB a un metro, para un coste de producción del primer prototipo de 350€.



Figura 1. Fotos de la caja acústica *Boombox* de *Night Owl Acoustics*

Tras un primer estudio de los sistemas de alimentación de cajas acústicas similares a la *Boombox* se observa que la batería más típicamente utilizada en este tipo de aplicaciones es la de iones de litio (Li-ion). Otras baterías de acumuladores adaptadas a la *Boombox* serían la de níquel hidruro metálico (Ni-MH), la de níquel zinc (Ni-Zn) y la de polímero de litio (LiPo). Los criterios decisivos en la elección del tipo de batería son el precio, la masa, la densidad energética, la vida útil y la seguridad de utilización de la misma. Una vez escogido el tipo de acumuladores, la elección de la batería concreta se deberá efectuar en función de los valores nominales de tensión y capacidad deseados.

El balanceado de las celdas o acumuladores individuales que componen la batería es una parte crucial del sistema de carga y constituye un factor clave para alargar la vida útil de la batería. Generalmente se considera que una diferencia de tensión superior a 0.1V entre células de una misma batería requiere el balanceo de la misma. Puede realizarse de una

forma activa (transferencia de la energía excedente de una célula de mayor estado de carga hacia otras de menor estado de carga) o pasiva (una célula de estado de carga superior al resto disipa su energía excedente a través de resistencias). Además de balancear la batería, una utilización segura de la misma requiere una cuidadosa vigilancia de los valores límites de tensión (máxima y mínima), intensidad (inyectada y extraída) y temperatura de la batería. Existen componentes en el mercado que realizan a la vez el balanceo y la vigilancia de uno o más de los aspectos relativos a la seguridad de la batería previamente citados, como pueden ser PCMs, BMSs o SMSs. Una última opción la constituyen los cargadores-balanceadores universales, así conocidos por servir para una pluralidad de baterías y configuraciones, ampliamente utilizados hoy en día.

El diseño íntegro del sistema de alimentación consiste en la elección de la batería más adaptada a la nueva caja acústica, en el diseño de un circuito que asegure una carga óptima de la batería, y en la inclusión de un sistema de balanceado de la misma, garantizando así una utilización y una carga seguras de la *Boombox*. Todo el proceso de concepción del sistema de alimentación está lógicamente sujeto a los límites de precio, potencia, horas de autonomía y peso deseados para el producto final. Por su parte, la realización física del sistema de carga incluye la búsqueda, elección y compra de los componentes electrónicos, la disposición y enrutamiento de los mismos en una tarjeta de circuitos impresos (PCB) y su posterior soldadura.

2. Metodología

En términos de alimentación se ha optado por una batería de polímero de litio. Los acumuladores de níquel resultan menos adaptados a una aplicación portátil de potencia que los acumuladores de litio, ya que la densidad energética de los primeros es menor (60-90Wh/kg si Ni-MH, 60-70 Wh/kg si Ni-Zn). Además presentan efecto memoria y tienen una duración de vida más corta (400-700 ciclos si Ni-MH, 600-1000 ciclos si Ni-Zn). La elección de polímero de litio se justifica por su masa inferior en comparación a los acumuladores de iones de litio, ya que el criterio más difícil de respetar en el desarrollo de la *Boombox* es un peso relativamente bajo que permita la portabilidad de la caja acústica. Es cierto que tienen una densidad energética ligeramente inferior (90-180Wh/kg frente a 120-140Wh/kg) y que son algo más caros, pero además de una masa reducida presentan otras ventajas en comparación a los acumuladores de iones de litio, como una mayor vida útil (1500 ciclos frente a 500-1000 ciclos) y una mayor seguridad de utilización.

Los requisitos de la batería vienen casi exclusivamente definidos por los amplificadores, cuya tensión nominal es de 15V y cuya intensidad requerida varía entre 560mA y 700mA en función del volumen. La voluntad de una autonomía de al menos 7h hacen que la batería LiPo escogida de 765g tenga una tensión nominal de 22.2V (configuración 6S1P) y una capacidad nominal de 5000mAh, disponible en HobbyKing por 38.41€. Así, se asegura una autonomía teórica de entre 7.142h y 8.93h, resultado de la división de 5000mAh entre 700mA y 560mA respectivamente.

Sin embargo, el núcleo central del proyecto lo constituye la concepción del circuito de carga y balanceo. En la figura 2 de la página siguiente se muestra el esquema final del mismo, realizado en Eagle Light. El funcionamiento se basa en el principio de carga de en dos tiempos. Teóricamente los acumuladores de litio se deberían cargar a tensión constante. Así, la intensidad inicial que se instalaría sería aproximadamente la diferencia entre la tensión aplicada y la tensión inicial en bornes, dividida por la resistencia interna. A medida que el acumulador se completara, la velocidad de carga disminuiría, ya que aumentaría la tensión interna de la celda y consecuentemente la intensidad disminuiría. En la práctica, si la tensión aplicada fuera la máxima (4.2V) la intensidad resultante sería demasiado elevada, por lo que la carga de un acumulador se realiza a tensión variable. Así, se aplica inicialmente una tensión inferior a la máxima que se aumenta poco a poco hasta alcanzar los 4.2V, con fin de mantener la intensidad constante. A partir de entonces, se conserva la tensión constante a 4.2V, disminuyendo paulatinamente la intensidad hasta alcanzar un valor previamente establecido (dependiente de la capacidad de la batería), momento en el que se considera que el acumulador está totalmente cargado. De aquí el nombre del principio de carga en dos tiempos.

Esto aplicado a la batería escogida consiste en proporcionar una corriente constante de alrededor de 3A hasta que la batería alcance su tensión máxima de 25.2V. Este valor de 3A respeta los límites de temperatura y corriente máxima inyectada en la batería, ya que es inferior a los 5A correspondientes a la tasa de carga recomendada de 1C para la batería elegida. Una vez se alcancen los 25.2V, el circuito deberá mantener constante la tensión, hasta que la corriente de la batería sea inferior a 50mA. El microcontrolador asegura este funcionamiento controlando el circuito *buck-boost* (reductor o elevador en función del valor de la tensión de alimentación del circuito de carga, variable entre 12V y 30V) mediante una señal PWM, cuyo ciclo de trabajo se calcula a partir de las medidas de intensidad y tensión de la batería.

La medida de intensidad se efectúa simplemente gracias a una resistencia en serie con la batería. Sin embargo, la medida de tensión necesita la medida de las tensiones de las células individuales, para poder detectar un posible desequilibrio de la batería y actuar en consecuencia. Las tensiones de las seis células se miden secuencialmente utilizando optoacopladores, y en caso de que la diferencia entre alguna supere los 0.1V se activa el circuito de balanceado correspondiente a la célula en cuestión. En este caso, se trata de un balanceado pasivo, ya que la energía excedente de la célula de mayor estado de carga se disipa mediante resistencias.

3. Resultados

La realización física del sistema de alimentación se ha llevado a cabo gracias al diseño en Eagle Light del circuito impreso. La posterior impresión y soldadura de los componentes elegidos se ha realizado en el laboratorio de electrónica de *Ecole Centrale Paris*. Se ha favorecido el uso de componentes de tipo SMD (soldadura superficial), ya que el tamaño máximo de placa permitido en Eagle Light es de 7cm x 9cm, lo que convierte en tarea

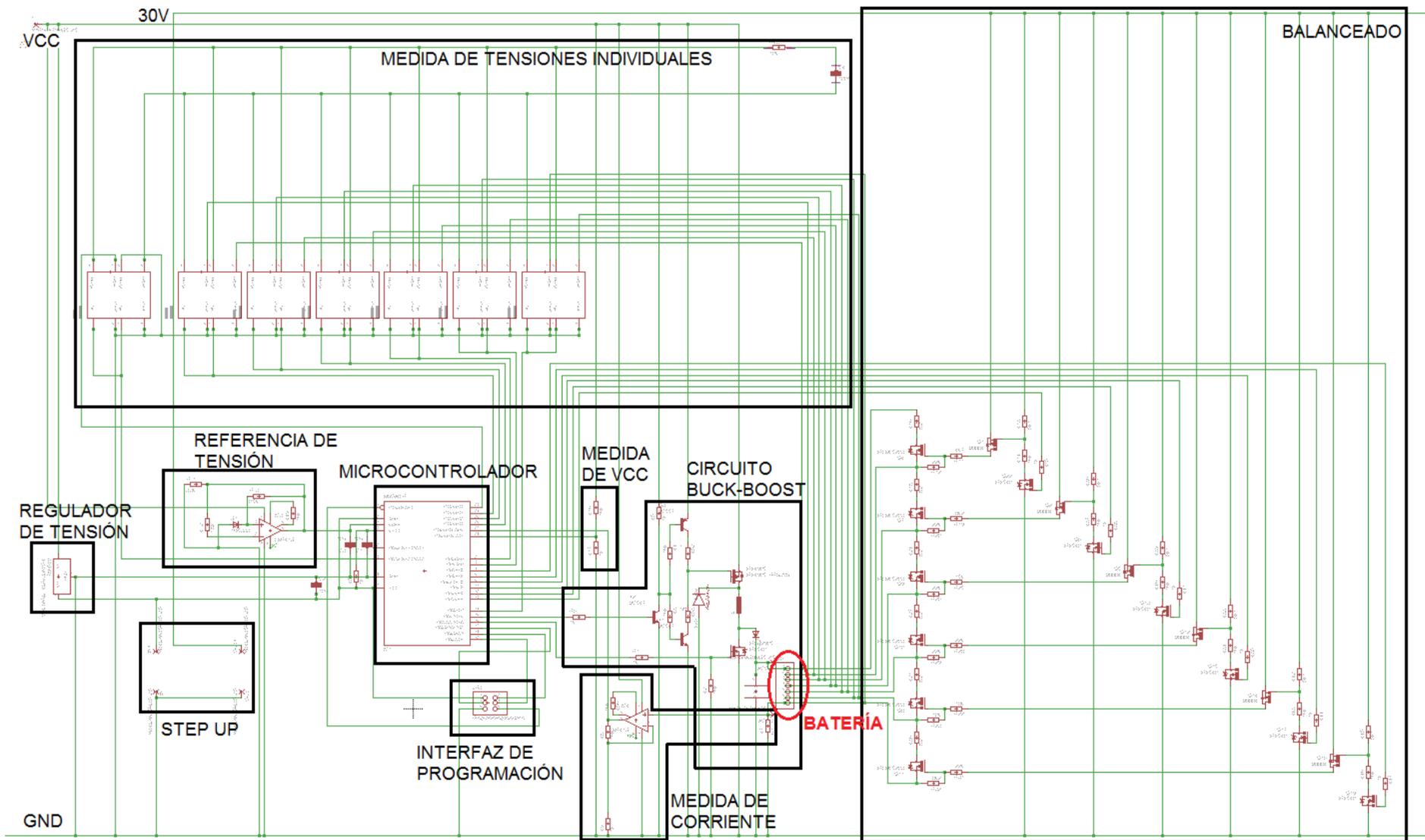


Figura 2. Esquema completo del circuito de carga

difícil el enrutado de todos los componentes del circuito. Una cuestión fundamental a la hora del diseño de la PCB es la elección del ancho de cada pista. Para ello se han utilizado los dos gráficos estandarizados publicados en el IPC2152 "Standard for Determining Current Carry Capacity in Printed Board Design" en 2009, donde para un espesor del cobre de 1Oz y un incremento de temperatura admisible de 45°C resulta sencillo deducir el ancho mínimo para una corriente máxima a soportar definida. La figura 3 muestra los dos archivos necesarios para la fabricación de la PCB, correspondientes a las capas superior e inferior de la misma, generados a partir del diseño previo en Eagle Light.

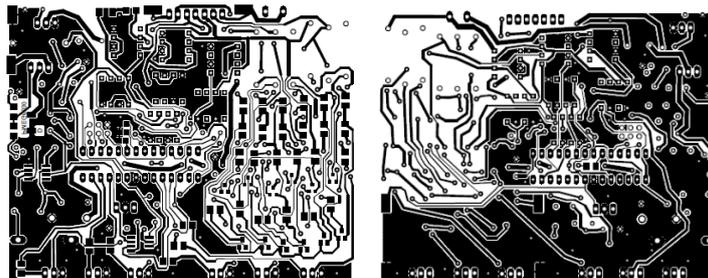


Figura 3. Plantillas de impresión de la PCB del circuito de carga, correspondientes a la cara superior (izquierda, impresa en espejo) e inferior (derecha)

El coste total de todos los componentes necesarios para la realización del sistema de carga es de 74.60€, lo que equivale a un 21% del coste total de producción de 352.27€ del primer prototipo. Si bien es cierto que ambos costes no incluyen la mano de obra ni la impresión de los circuitos impresos, una futura producción en masa del producto conduciría muy posiblemente a una disminución del coste global de producción. El coste de los componentes necesarios para la realización del circuito de carga es de 27€. Una primera comparación orientativa de este valor con el precio de mercado de un cargador balanceador típico (45€), manifiesta el interés de la concepción del circuito de carga.

4. Conclusiones

La voluntad de comercializar la caja acústica a través de la recién creada empresa *Night Owl Acoustics* implica una continuación del proyecto, con vistas a perfeccionar el producto en todos sus aspectos, incluido el de alimentación y carga. De este modo, un segundo prototipo de la caja acústica debería permitir al consumidor conocer el estado de la batería y el tiempo estimado de utilización restante. La opción más clásica e intuitiva consiste en incluir una pantalla LCD, que muestre en permanencia no sólo el estado de la batería y el tiempo de utilización restante, sino también otros aspectos como el título de la canción reproducida, el volumen seleccionado, etc. Una opción complementaria sería la iluminación del túnel de la caja acústica mediante LEDs de diferentes colores, en función del estado de carga de la batería. Una última mejora técnica importante a considerar para el segundo prototipo sería la posibilidad de funcionamiento sin batería, alimentándose la caja acústica directamente a través de la red. Esta funcionalidad permitiría al cliente comprar un producto cuya vida útil no esté marcada por el número de ciclos de carga y descarga de la batería que le alimenta.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF A NEW LOUDSPEAKER ENCLOSURE

1. Introduction

The present document describes the power supply design and development of the new loudspeaker enclosure *Boombox*, created by *Night Owl Acoustics* (see figure 1). It is a new loudspeaker enclosure entirely conceived and assembled in the French university *Ecole Centrale Paris* by a 6-member group of students. The project starts with the buying desire of an inexistent portable loudspeaker: high power, high sound quality and price tag around 400€ are the characteristics required. The new product is based on a threefold commitment: for an energy autonomy superior to 7h and a total weight of 10.3kg, the *Boombox* has a maximum power of 300W, a RMS power of 160W, an acoustic sensitivity of 85dB@1m and an acoustic pressure of 110dB@1m, all for a production cost of 350€ for the first prototype.



Figure 1. Loudspeaker enclosure Boombox by Night Owl Acoustics

It can be concluded after studying the power systems of similar loudspeaker enclosures that the most commonly used battery for these types of applications is the lithium ion one (Li-ion). Other possibilities adapted to the *Boombox* would be the nickel-metal hydride battery (Ni-MH), the nickel-zinc battery (Ni-Zn) and the lithium polymer battery (LiPo). The decisive criterion for choosing the correct type of battery are its price, its weight, its specific energy, its working life and its safety of use. Once chosen the type of chemistry, the specific battery is chosen according to the desired nominal voltage and current values.

Balancing of the cells constituting the battery is vital in the charging circuit design. It also plays a key role in increasing the battery's working life. A battery is usually considered to be unbalanced if there is a voltage difference superior to 0.1V among its cells. Balancing can be active (energy transfer from the cell with a higher state of charge to the others) or passive (the surplus energy of the cell with a higher state of charge is dissipated through resistors). Besides balancing, there are other considerations that need to be taken into account in order to safely use a battery. Its voltage levels (higher and lower limits), its maximum current (injected and extracted) and its temperature must be closely monitored at all times. There are components on the market such as PCMs, BMSs or SMSs that both balance and protect the battery regarding some of the aspects just mentioned. However, the most widely used devices for balancing and watching over the battery's safety are chargers. They are known as *universal* balancing-chargers, since they can be used for charging a large variety of batteries' chemistries and cell configurations.

The power system complete design comprises the choice of the most adapted battery to the new loudspeaker enclosure, the conception of a circuit capable of charging the battery in an optimal way, and the development of a battery-balancing system, ensuring a safe charge and use of the product. Logically, the whole power system conception is conditioned by the imposed constraints in terms of price, power, autonomy and weight desired for the *Boombox*. As for the physical implementation of the charging circuits, it comes down to choosing and buying the right electronic components, as well as arranging, routing and soldering them on a Printed Circuit Board (PCB).

2. Methodology

Regarding the power supply, the chosen chemistry for the battery is lithium polymer. Nickel accumulators are less adapted to portable power applications, since their specific energy is inferior (60-90Wh/kg if Ni-Mh, 60-70 Wh/kg if Ni-Zn). Besides, they present memory effect and they have a shorter working life (400-700 cycles if Ni-MH, 600-1000 cycles if Ni-Zn). Choosing lithium polymer over lithium ion is justified by its lower mass, since the most difficult requirement in terms of developing the *Boombox* is by far keeping its weight low so that portability is ensured. Although their specific energy is slightly lower (90-180Wh/kg versus 120-140Wh/kg) and they are more expensive, they offer other advantages besides their mass when compared to Li-ion: they have a higher working life (1500 cycles versus 500-1000 cycles) and they are safer to use.

The chosen amplifiers define almost exclusively the technical characteristics of the battery to choose. They use a nominal voltage of 15V and their required current varies between 560mA and 700mA, depending on the volume. The willingness of at least 7h of autonomy contributes as well to the battery choice. The LiPo battery bought (38.41€ at HobbyKing) weighs 765g, has a nominal voltage of 22.2V (6S1P configuration) and a nominal capacity of 5000mAh. Thus, the *Boombox* has a theoretical autonomy that varies between 7.142h and 8.93h. This figure result from the division of 5000mAh by 700mA and 560mA respectively.

Nevertheless, the balancing and charging circuit design is at the heart of this project. Figure 2 shows the complete final circuit, laid out in Eagle Light. The circuit works on the basis of the so called two-stage charging principle. Theoretically, lithium accumulators are charged at a constant voltage. Therefore, the initial current installed is approximatively the difference between the applied and initial voltages, divided by the internal resistor. As the accumulator charges, the charging speed diminishes, since the internal accumulator voltage increases and current consequently decreases. In real life, if the applied voltage equals the maximum (4.2V), the resulting current would be too high. That is why accumulators are charged at a variable voltage. The voltage initially applied is lower than 4.2V, gradually increasing until the 4.2V limit is reached, always keeping the current constant in the process. From that moment on, voltage is kept constant at 4.2V, gradually decreasing the resulting current until it comes lower than a previously fixed

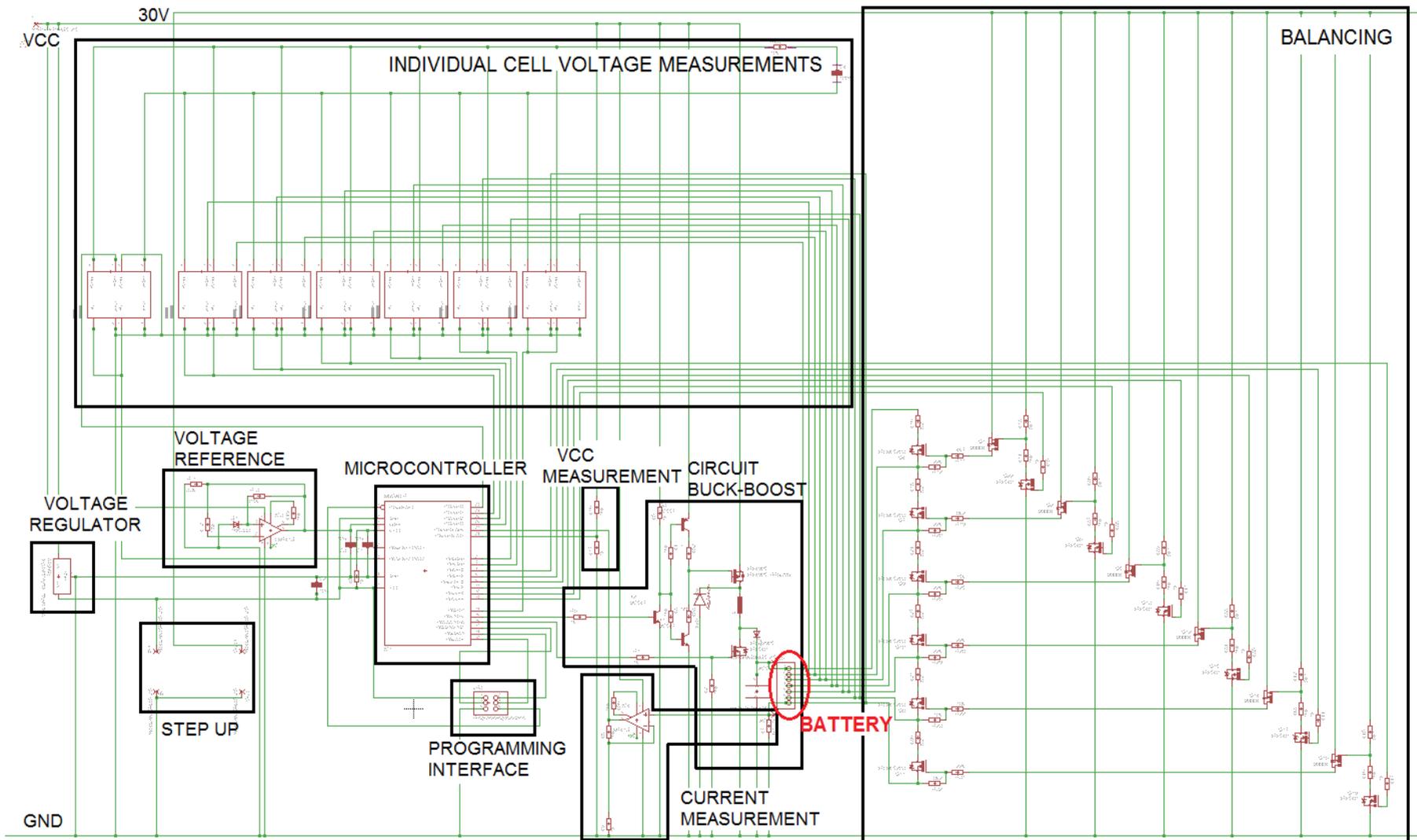


Figure 2. Balancing-charging circuit schematics

value, dependent on the battery's capacity. At this point, the accumulator is considered to be fully charged. This process is commonly known as the two-stage charging principle.

When applied to the chosen battery for this application, the charging circuit must provide a constant current of 3A until the battery's voltage reaches 25.2V. This current value respects both the temperature and the injected current safety constraints, since it is lower than 5A, which would be the corresponding value of a charging current operating at a charging rate of 1C. Once the 25.2V limit is reached, the circuit must keep the voltage constant, until the resulting current becomes lower than 50mA. The microcontroller ensures the charging process just described by controlling the buck-boost circuit (buck or boost functionality depends on the charging circuit supply voltage, variable between 12V and 30V) through a PWM signal, whose duty cycle is calculated from the current and voltage measurements.

Current measurement is done by means of a series resistor connected to the battery. However, voltage measurement needs individual cell voltage measurements in order to be able to detect a balancing default and correct it. The voltage measurement of the six cells is sequentially performed using opto-couplers. In case a difference higher than 0.1V is detected, the corresponding balancing circuit of the problematic cell is activated. The balancing is of the passive type, since the surplus energy of the cell with a higher state of charge is dissipated through a resistor.

3. Results

The physical realization of the power system has been accomplished through the PCB design in Eagle Light. Further impression and components soldering has been carried out at *Ecole Centrale Paris*'s electronics laboratory. SMD components have been privileged since superficial soldering saves space in the rather overfilled printed circuit. The maximum PCB size allowed by Eagle Light is 7cm x 9cm, which complicates the routing of components. A key aspect when designing a PCB is the routes' width. Two standardized graphs published in the IPC2152 "Standard for Determining Current Carry Capacity in Printed Board Design" in 2009 are very useful when it comes to determining the minimum path width for a defined maximum current, being known both the copper's height (1Oz) and the maximum temperature increase allowed (45°C). Figure 3 shows the two files needed to print the PCB, generated from the previous Eagle Light layout design.

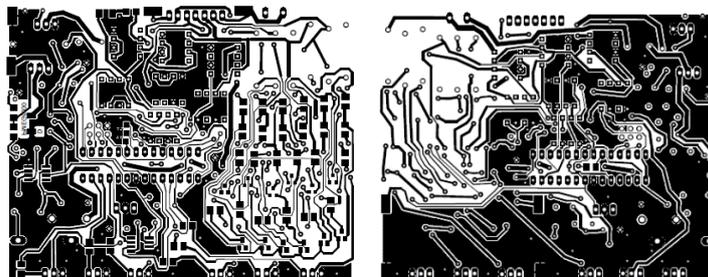


Figure 3. Charging circuit PCB printing templates, top (left, mirrored) and bottom (right) surfaces

The total cost of all the necessary components for the physical implementation of the power system is 74.60€. This amount represents the 21% of 352.27€, which is the total production cost of the first *Boombox* prototype. Even if both figures don't include labour nor the printing PCB costs, a future mass product production would very likely lead to a reduction in the total production cost. The components involved in the constitution of the balancing-charging circuit account for 27€. A rough comparison of this value with the typical market price of a universal charger (45€) brings to light the interest of the balancing-charging circuit conception.

4. Conclusions

The willingness of *Boombox*'s commercialisation through the just created start-up *Night Owl Acoustics* forces the project continuity, so as to perfect every aspect of the product, including the power system. Therefore, a second loudspeaker enclosure prototype should allow the user to know the battery's state of charge and the estimated remaining time of use. The most intuitive and classical solution would be to include a LCD display permanently showing not only the state of charge and remaining time, but other features as well, such as the title of the song being currently reproduced, the selected volume, etc. Another complementary option would be to illuminate the enclosure's tunnel using different coloured LEDs, depending on the battery's state of charge. A final major technical improvement to consider for the second prototype would be the possibility of working without a battery, being the loudspeaker enclosure directly supplied by the electric appliance. This feature would reassure the user into buying a product whose lifetime would not defined by the number of charge/discharge cycles of the battery.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA,
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

CONCEPCIÓN Y REALIZACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE UNA NUEVA CAJA ACÚSTICA

Autor: Sara Bernaldo de Quirós Redondo
Director: Jean-Pierre Fanton (Ecole Centrale Paris)

Madrid
Junio 2015

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	19
2. OBJETO DEL PROYECTO Y MOTIVACIÓN	23
3. ESTADO DE LA TÉCNICA.....	24
3.1. Sistemas de alimentación de cajas acústicas.....	24
3.2. Acumuladores y baterías.....	27
3.3. Principios de carga y cargadores.....	32
3.4. Conclusiones.....	34
4. BATERÍA DE POLÍMERO DE LITIO.....	35
5. CONCEPCIÓN DEL CIRCUITO DE CARGA.....	37
5.1. Introducción.....	37
5.2. Alimentación del circuito de carga.....	39
5.3. Circuito buck-boost.....	42
5.4. Balanceado de la batería.....	51
6. REALIZACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	54
6.1. Diseño y fabricación de la PCB.....	54
6.2. Costes de producción.....	57
7. CONCLUSIÓN.....	60
ANEXOS.....	62
TABLA DE FIGURAS.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64

1. INTRODUCCIÓN

Este mundo tan tecnológicamente dependiente de la electricidad se enfrenta inevitablemente al problema del almacenamiento de ésta, en especial cuando se trata del almacenamiento de energía a gran escala. Así, la entrada progresiva de las energías renovables en el sistema eléctrico ha ido acompañada de un creciente interés por las baterías, ya que estas últimas constituyen un elemento clave a la hora de contrarrestar la intermitencia renovable. Sin embargo, se podría decir que el mayor impacto de las baterías en el día a día de los consumidores se da en las aplicaciones de baja y media potencia, como pueden ser smartphones, tablets u ordenadores portátiles. El uso de este tipo de dispositivos ha crecido de una forma exponencial en los últimos años, sufriendo diariamente los usuarios las consecuencias de una relativamente corta duración de la batería. Además, la tendencia actual de producción de dispositivos cada vez más ligeros obliga a una gestión mucho más eficiente de la carga y descarga de las baterías.

El trabajo que presenta este documento se enmarca en este fascinante contexto, ya que describe la concepción y realización del sistema de alimentación más adaptado a una aplicación de potencia media muy concreta: la caja acústica *Boombbox* de *Night Owl Acoustics*. Se trata de una nueva caja acústica portátil, desarrollada y construida por un grupo de seis estudiantes de la universidad francesa Ecole Centrale Paris. El sistema de alimentación es sólo uno de los cinco ejes de este proyecto anual, también constituido por la cadena electroacústica, la interfaz con el usuario, el diseño y la fabricación del exterior de la caja, y finalmente la creación de una marca y la búsqueda de inversores. Lógicamente, el sistema de alimentación está sujeto a los límites de precio, potencia, horas de autonomía y peso deseados para el producto final. Por ello, las características técnicas y los modos de uso previstos de la *Boombbox* definirán la elección de una batería u otra, y marcarán los requisitos a cumplir por el sistema de carga. En consecuencia, no es posible entender la explicación detallada de la concepción del sistema de alimentación eléctrica de la caja acústica sin antes describir brevemente qué se entiende por caja acústica portátil y cuáles son las características y usos de la caja acústica *Boombbox* en particular.

¿Qué se entiende por caja acústica portátil?

El término caja acústica hace referencia al sistema electroacústico compuesto por una caja exterior y por altavoces. Su función consiste en reproducir, a partir de una señal eléctrica, un sonido previamente grabado. Para ello es necesario que la señal sea transformada en una onda acústica, es decir, en vibración mecánica del aire, propagándose ésta en forma de ondas longitudinales gracias a la elasticidad del fluido portador. [BORU08] La transformación de la señal eléctrica a onda acústica se hace por medio del altavoz. El más utilizado, el electrodinámico, se basa en la combinación de un

campo magnético permanente y de una bobina sujeta a una membrana elástica. La señal eléctrica a transformar recorre la bobina, creando la corriente una fuerza de Lorentz responsable del movimiento de la membrana, transmitiéndose así la energía mecánica al aire ambiente. [BORU08] Generalmente, un solo altavoz no es capaz de reproducir el espectro entero de frecuencias audibles por el ser humano (20Hz-20kHz), por lo que las cajas acústicas suelen recurrir a una combinación de altavoces, funcionando cada uno en una parte diferente del espectro.

La caja en la que se encuentran los altavoces es necesaria para evitar un “cortocircuito acústico”, ya que los altavoces electrodinámicos suelen estar abiertos (no disponen de una pared rígida que separe un lado de otro de la membrana). De no encontrarse en una caja acústica, el sonido emitido por el altavoz electrodinámico sería fuertemente atenuado, ya que existiría circulación de masa de aire desde el lado de mayor presión de la membrana hacia el lado de menor presión, atenuándose así las ondas delanteras del altavoz con las traseras. [HECK75] En función de la gestión de las ondas traseras, podemos distinguir dos tipos de cajas acústicas. Las cajas abiertas utilizan el sonido producido en su interior para aumentar la potencia sonora, y con ello la eficacia energética. [SMAL06] Las cajas cerradas, por su parte, quieren absorber todo sonido emitido por la parte trasera de la membrana, evitando así cualquier interferencia entre ambas señales.

La caja acústica típica se encuentra normalmente conectada a un amplificador externo. Esto se debe a que las fuentes de señal usuales, tales como CDs o smartphones, no son capaces de proporcionar una potencia de sonido elevada, ya que suelen estar concebidas para la alimentación de auriculares. La resistencia interna de estos varía entre 16Ω y 32Ω , mientras que la resistencia interna de una caja acústica suele estar comprendida entre los 4Ω y 8Ω . Al ser esta resistencia inferior, la corriente generada al conectar la fuente de señal a la caja acústica es más elevada, lo que puede constituir una sobrecarga para la fuente de señal. Además, la amplitud de señal comprendida entre 0.5V y 0.7V no suele ser suficiente para alcanzar una potencia sonora deseada.

Si se quiere que la caja acústica sea portátil, es necesario que el amplificador esté situado en el interior de la caja. Una caja de estas características se conoce como caja acústica activa. Sin embargo, colocar el amplificador dentro de la caja acústica no es suficiente para garantizar una verdadera portabilidad al usuario, ya que también hay que incluir la fuente de alimentación eléctrica del amplificador en el interior de la caja, para así evitar la dependencia de un enchufe fijo.

¿Qué caracteriza a la nueva caja acústica «Boombox»?

La idea de desarrollar la caja *Boombox* surge de la voluntad de compra de una caja acústica portátil de potencia elevada, de alta calidad sonora y de precio alrededor de los 400€. La falta de productos en el mercado reuniendo la combinación deseada de los

criterios anteriores conduce a la fabricación de una nueva caja acústica, adaptada a la necesidad concreta de una demanda insatisfecha. Así, el nuevo producto se basa en el triple compromiso entre alta calidad sonora, portabilidad y precio. En cuanto a los modos de utilización previstos de la *Boombox*, los diferentes usos varían desde fiestas en domicilios privados hasta picnics al aire libre.



Figura 1. Fotos de la caja acústica Boombox terminada, con el logo de la marca Night Owl Acoustics en negro

De esta forma, para un coste de producción algo inferior a los 400€ y un peso total de 10.3kg, la *Boombox* tiene una potencia máxima de 300W, una potencia RMS de 160W, una sensibilidad acústica de 85dB/W a un metro, una presión acústica de 110dB a un metro, y una autonomía superior a siete horas. Estos últimos valores tienen por objeto proporcionar un orden de magnitud para poder comparar correctamente la *Boombox* con las demás cajas acústicas existentes en el mercado. Hay que tener en cuenta que, por ejemplo, las horas de autonomía dependerán fuertemente del uso que se haga de la caja. También el hecho de que al ser la *Boombox* una caja acústica activa, la misma noción de sensibilidad acústica resulta algo inapropiada, ya que la sensibilidad se define en relación a una señal de entrada, y en el caso de una caja acústica, ésta es una señal amplificada. Además, la configuración del DSP (*Digital Signal Processor*) también influirá en la sensibilidad acústica final.

Como ya se ha adelantado en el párrafo anterior, la caja acústica cuenta con un procesador digital de señales o DSP, encargado de separar el espectro de frecuencias en tres vías. De esta forma, el DSP muestrea la señal digital íntegra que le llega con una frecuencia de al menos 44.1kHz^3 ; filtrándola después por convolución. [MCCL03] Así el espectro acústico queda dividido en tres zonas: las frecuencias inferiores a 120Hz, las comprendidas entre 120Hz y 4kHz, y las comprendidas entre 4kHz y 20kHz. Esta división se justifica para evitar el efecto *crossover* en las frecuencias intermedias (de 300Hz a 3kHz), donde el oído humano es mucho más sensible a la distorsión acústica. De esta

³ De acuerdo con el teorema de Shannon-Nyquist, para conseguir reproducir perfectamente la gama de frecuencias hasta los 20kHz, es necesaria una frecuencia mínima de muestro de 40kHz.

forma, a la salida del DSP la cadena electroacústica se triplica, ya que cada zona del espectro pasa por un convertidor digital-analógico, un amplificador y un altavoz propios.

Lógicamente existen cajas acústicas de mayor calidad sonora que la *Boombox*, pero situadas en una gama de precios superior y sin ser verdaderamente portátiles, debido a las grandes dimensiones que ostentan. De igual manera, existen cajas acústicas de mayor portabilidad y menor precio, pero siempre en detrimento de la calidad sonora, en especial en lo que concierne a las bajas frecuencias. El compromiso único entre calidad y portabilidad de la *Boombox* en su gama de precios se debe en gran medida a la elección de una caja abierta de tipo *bass reflex* (recinto acústico reflector de bajos), gracias a la cual se consigue una muy buena respuesta en amplitud para bajas frecuencias con unas dimensiones de caja razonables.

2. OBJETO DEL PROYECTO Y MOTIVACIÓN

El objeto de este proyecto es la concepción y la realización física del sistema íntegro de alimentación de la caja acústica *Boombox*. Esto se traduce en un primer tiempo en la elección y posterior compra del tipo de acumuladores más adaptados al producto, ya sea en forma de batería o de celdas individuales combinadas en serie y/o paralelo.

Lógicamente, la concepción del sistema de alimentación también incluye la concepción del sistema de carga de los acumuladores elegidos. Esto implica el diseño de un circuito que asegure una carga óptima de los acumuladores y una supervisión continua del estado de la batería, para garantizar una utilización y una carga seguras de la caja acústica. En este aspecto, el balanceado de las celdas de la batería es una parte crucial del sistema de carga, y además constituye un factor clave para alargar la vida útil de la batería. La programación del microcontrolador es otro aspecto fundamental en la concepción del sistema de carga. Sin embargo, dicho programa no será expuesto en este documento, ya que ha sido desarrollado conjuntamente con otros miembros del equipo.

Por su parte, la realización física del sistema de carga incluye la búsqueda, elección y compra de los componentes electrónicos más adaptados a las imposiciones de tamaño, presupuesto y funcionamiento requerido del sistema de alimentación. También es objeto de la realización física del sistema de carga la disposición y enrutamiento de los componentes electrónicos en una tarjeta de circuitos impresos (PCB) y la posterior soldadura de los mismos.

El sistema de alimentación de la *Boombox* constituye pues un elemento esencial del producto final. Es imprescindible para el funcionamiento de la caja acústica, ya que no sólo alimenta los tres amplificadores, sino también el circuito de control principal. De igual manera, es un factor clave a la hora de asegurar al usuario una verdadera portabilidad, proporcionándole el mayor número de horas de autonomía posibles. De esta forma, la mayor motivación de este proyecto se basa en la certeza de que sin el desarrollo del sistema de alimentación no existiría el producto final, en la satisfacción de aportar un gran valor añadido a la nueva caja acústica, y en la implicación personal en la creación de la *Boombox*, con motivo de la oportunidad de negocio que crea la necesidad tecnológica real de la demanda.

3. ESTADO DE LA TÉCNICA

3.1. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE CAJAS ACÚSTICAS

Esta sección presenta el estado de la técnica en cuanto a sistemas de alimentación de cajas acústicas similares a la *Boombox*. Debido a la singularidad de la nueva caja acústica, hay muy pocas opciones a estudiar en el mercado que reúnan las mismas características en términos de precio, portabilidad y calidad excepcional del sonido, tanto a altas como a bajas frecuencias. Ya sea con fin de evitar plagios de otras empresas competidoras o por desinterés y/o desconocimiento del comprador, las pocas opciones similares a la *Boombox* no ofrecen demasiada información sobre las características técnicas del sistema de alimentación. Los datos relevantes más comúnmente proporcionados son el tipo de batería y el número de horas de autonomía. Sin embargo, otros criterios de conocimiento público que pueden ser útiles por su relación con el sistema de alimentación son el número de vías en las que se encuentra dividido el espectro de frecuencias, el tipo de amplificador utilizado o la potencia RMS de la caja acústica, así como el precio y el peso en una menor medida.

Existen cuatro cajas acústicas portátiles que resumen lo que se puede encontrar actualmente en el mercado. Las dos primeras tienen una potencia baja, alrededor de los 20W RMS, pero son altamente portátiles, al ser su peso inferior a los 2kg. Se trata de la caja acústica *Fidelio P9BLK wireless portable speaker* de Philips [CAJA1] y de la caja acústica *Soundlink III* de Bose [CAJA2]. Ambas constituyen una cota inferior de la *Boombox* en términos de precio, ya que se sitúan en el umbral de los 300\$, y también en términos de calidad sonora, ya que el espectro de frecuencias sólo se divide en dos vías y la distorsión en bajas frecuencias es considerable. Las dos opciones utilizan baterías de litio ion integradas en la caja acústica, e incluyen un cargador adaptador CA-CC, siendo en ambos casos requerida una alimentación alterna de 100-240V y 50-60Hz.



Figura 2. *Fidelio P9BLK wireless portable speaker* (izquierda) y *Soundlink III* (derecha)

- La caja *Fidelio* tiene 8h de autonomía y tarda 4h en cargarse por completo. La intensidad máxima de entrada de la caja acústica es de 800mA (1000mA como máximo para cargar la batería, que es de 2200mAh y de 11.1V), siendo las características de salida 15V de CC y 2A como máximo.
- La caja *Soundlink*, por su parte, tiene 14h de autonomía y tarda 3h en cargarse por completo. La intensidad máxima de entrada de la caja acústica es de 600mA, siendo las características de salida 17V de CC y 1A como máximo.

Las otras dos cajas tienen una potencia mucho mayor manteniéndose portátiles, ya que pesan entre 5 y 7kg para una potencia de entre 150 y 200W RMS. Sin embargo, el precio de ambas se sitúa en torno a los 700\$, valor superior al precio deseado de la *Boombox*⁴. Se trata de la caja acústica *Sony Ultra Premium high-res speaker SRSX9*, de Sony [CAJA3], y la caja acústica *Ibox*, de Thodio [CAJA4]. Pese a su precio superior, puede que la calidad sonora sea inferior en comparación a la *Boombox*, ya que ambas utilizan exclusivamente amplificadores de clase D y ello se traduce en un mayor nivel de distorsión en caso de no haber una gestión perfecta del filtrado del espectro de frecuencias. Para la *Ibox* esto parece altamente improbable al estar el espectro dividido en sólo dos vías.



Figura 3. *Sony Ultra Premium high-res speaker SRSX9 (izquierda) e Ibox (derecha)*

- La caja *Sony* utiliza presumiblemente baterías AA, pero se desconoce su número, composición química y características. La alimentación alterna requerida de la caja es de 120V y 60Hz, siendo las características de salida de 19.5V de CC y 2.1A como máximo.
- La caja *IBOX*, por su parte, tiene entre 10 y 12h de autonomía para una batería de gel integrada de 2000mAh y 24V. Las horas de autonomía pueden

⁴ El coste máximo de producción del primer prototipo se ha fijado en 400€. Lógicamente, dicho coste disminuirá notablemente con la producción en masa de la caja acústica, por lo que resulta lícito imaginar que el precio de venta final del futuro producto, comercializado a gran escala, sea próximo a los 400€.

aumentarse hasta 26h en caso de utilizar una batería litio ion integrada de 5200mAh y 28V, gracias a 14 celdas de la marca Samsung. En este caso el precio aumenta de 100\$ y el peso disminuye de 1kg aproximadamente. Otra posibilidad es llegar hasta las 48h de autonomía por 180\$ más respecto del precio original, disminuyendo el peso de 0.65kg aproximadamente. Esto se consigue gracias a una batería litio ion integrada de 9300mAh y 28V, utilizando 21 celdas de la marca Panasonic. [ETSY]

De este primer estudio de las cuatro cajas acústicas más similares a la *Boombox* se concluye que la batería más utilizada para este tipo de aplicación es la batería litio ion, integrada dentro de la caja acústica, quedando en el exterior exclusivamente el cargador-adaptador de CA a CC. También puede deducirse que el tiempo de carga de la batería gira en torno a las 4h, que las 7h de autonomía son un objetivo realizable y que la tensión necesaria de la batería aumenta con la potencia de la caja acústica. Valores usuales de corriente máxima y de tensión continua proporcionados por la batería parecen ser 2A y 19V para una potencia RMS del orden de magnitud de la correspondiente potencia en la *Boombox*.

3.2. ACUMULADORES Y BATERÍAS

Si se quiere respetar la consigna de un coste de producción no superior a los 400€, el precio de los acumuladores no puede ser excesivo. Por ello, no se considera aquí la posibilidad de recurrir a soluciones innovadoras como pueden ser las pilas de combustible o los acumuladores electromagnéticos [3][4], pasando directamente al estudio de los diferentes acumuladores eléctricos convencionales.

¿Qué diferencia hay entre pila, acumulador y batería?

Antes de enunciar las características más importantes de este tipo de acumuladores, es conveniente aclarar la terminología hoy en día utilizada y diferenciar entre pila, acumulador y batería. Una pila eléctrica es un dispositivo capaz de transformar la energía química en energía eléctrica. Por definición, una pila no es recargable, debido a la irreversibilidad de la reacción química que tiene lugar. [5] Por su parte, un acumulador eléctrico designa un dispositivo capaz de almacenar energía eléctrica. En este contexto, dicho almacenamiento se hace en forma de energía química, y podemos distinguir distintos tipos de acumuladores en función de la naturaleza química de sus electrodos. Por definición, los acumuladores son recargables, y tienen así un número determinado de ciclos de carga y descarga durante su vida útil. [5] Finalmente, una batería de acumuladores o batería designa simplemente la combinación de varios acumuladores en serie y/o en paralelo en un mismo envoltorio. [5]

¿Qué parámetros definen a un acumulador eléctrico?

A la hora de escoger un acumulador, hay una serie de parámetros a tener en cuenta. Para empezar, la tensión nominal (V) del mismo suele estar comprendida entre 1 y 4V, dependiendo de la naturaleza química de los electrodos. Una caja acústica como la *Boombox* necesita una tensión de alimentación muy superior a los 4V para conseguir la potencia deseada, por lo que será necesario combinar en serie varios acumuladores⁵. La capacidad (mAh) designa la carga eléctrica que puede proporcionar el acumulador cuando está totalmente cargado. Por ejemplo, un acumulador de 3000mAh podrá teóricamente proporcionar una corriente constante de 3A durante una hora, o una de 6A durante media hora, etc. Este concepto no debe confundirse con la tasa de descarga del acumulador, expresada en "C" o en "h⁻¹". La tasa de descarga permite calcular la corriente máxima (constante o pico) que puede proporcionar un acumulador. Por ejemplo, si el

⁵ La tensión final de la combinación en serie de acumuladores eléctricos es la suma de las tensiones individuales. La capacidad final de la combinación en paralelo de acumuladores eléctricos es la suma de las capacidades individuales.

acumulador previo de 3000mAh tuviera una tasa de descarga constante de 2C, la corriente constante máxima que podría proporcionar sería de 6A (2C·3000mAh), a pesar de que teóricamente no haya inconveniente en proporcionar una corriente constante de 12A durante quince minutos. La tasa de carga suele fijarse a 1C, sea cual sea la capacidad del acumulador. Por su parte, la impedancia interna del acumulador (Ω) limita la corriente de descarga debido a la caída de tensión que provoca, y finalmente, la densidad energética (Wh/kg) mide la cantidad de energía que puede restituirse dividida por la masa del acumulador. [6] Otros parámetros interesantes a tener en cuenta son la vida útil de la batería (medida en número de ciclos de carga y descarga), la autodescarga y la fiabilidad. [7][8]

¿Qué acumulador eléctrico es el más adaptado a la Boombox?

Dentro de la gran variedad de acumuladores eléctricos podemos distinguir tres tipos principales que se exploran en los párrafos siguientes: los acumuladores de plomo, los acumuladores de níquel y los acumuladores de litio. [6] [DEVI12]

Los acumuladores de plomo no constituyen una opción real para la aplicación propuesta a pesar de su muy bajo precio (<1€/kWh otorgado) [BRUN09], ya que pesan demasiado, siendo su densidad energética muy pequeña (15-40Wh/kg) [DEVI12] y su capacidad específica insuficiente (7-20Ah/kg) [DEVI12]. Además, el plomo es un material tóxico.

Los tres tipos de acumuladores de níquel más extendidos son el níquel cadmio (Ni-Cd), el níquel hidruro metálico (Ni-MH) y el níquel zinc (Ni-Zn). El primero no es considerado aquí por no presentar ninguna ventaja importante en comparación a los otros dos, siendo además el cadmio un material tóxico. El Ni-MH y el Ni-Zn son bastante similares, y resultan menos adaptados a una aplicación portátil de potencia que los acumuladores de litio, ya que la densidad energética de los acumuladores de níquel es inferior (60-90Wh/kg si Ni-MH, 60-70 Wh/kg si Ni-Zn). [DEVI12] Además, en comparación a los acumuladores de litio, los acumuladores de níquel presentan efecto memoria (efecto inexistente para los primeros [9]), una vida útil más corta (400-700 ciclos si Ni-MH, 600-1000 ciclos si Ni-Zn) [DEVI12] y una tensión nominal inferior (1.3V si Ni-MH, 1.7V si Ni-Zn). [DEVI12]

En cuanto a los acumuladores de litio, existen fundamentalmente tres opciones: litio metal (Li-metal), litio ion (Li-ion) y litio ion polímero (LiPo). En este caso, resulta más difícil la generalización de las características, ya que las propiedades de los acumuladores de litio varían bastante en función de la química escogida para los electrodos. De todas formas, la tensión nominal es superior a los 3.5V para todos los tipos. La opción Li-metal tiene una vida útil muy corta (alrededor de 400 ciclos) y el electrolito líquido conlleva problemas de seguridad, por lo que se descarta su uso en esta aplicación.

Como se ha visto en la sección anterior, las baterías Li-ion son una elección común cuando se trata de cajas acústicas. Sin embargo, los acumuladores LiPo son algo más ligeros que los Li-ion. En la *Boombbox*, la descomposición del espectro de frecuencias en tres zonas y la consecuente triplicación de la cadena electroacústica hacen que resulte muy difícil cumplir con el requisito de un peso total de la caja inferior a los 10kg. Por ello, la masa inferior de los acumuladores LiPo se convierte en criterio decisivo en la elección del tipo de acumulador, a pesar de ser más caros y de tener una densidad energética ligeramente inferior en comparación a los Li-ion (90-180Wh/kg frente a 120-140Wh/kg). [DEVI12] Además de una masa reducida, los LiPo presentan otras ventajas frente a los Li-ion que también contribuyen a su elección final. Entre ellas se encuentran una mayor vida útil (1500 ciclos frente a 500-1000 ciclos [DEVI12]) o una mayor seguridad, ya que ofrecen una mayor resistencia a la sobrecarga y a las pérdidas de electrolito gracias a la utilización de un polímero sólido.

¿En qué consiste el balanceado y qué papel juega en la seguridad de la batería?

Para comprender la necesidad del sistema de balanceo es una batería, antes es conveniente precisar que los acumuladores de litio en general, y los acumuladores LiPo en concreto, no deben funcionar fuera de unos límites de tensión. Por ejemplo, si se somete a una célula LiPo de tensión nominal 3.7V a una tensión mayor a 4.2V, existe una gran probabilidad de que deje de funcionar correctamente y, si sigue aumentando la tensión, de que se produzca la explosión de la misma. De igual forma, si la tensión de la célula cae por debajo de los 3V, esta no volverá a proporcionar energía. En la práctica, por razones de seguridad, se suelen considerar como valores de tensión aceptables los comprendidos entre 3.5 y 4.2V. La gráfica siguiente ilustra la curva de descarga de un ejemplo concreto de acumulador LiPo. En ella se aprecia cómo la tensión se mantiene constante en torno a los 3.7V (valor dependiente de la capacidad y de la tasa de descarga) durante la mayor parte de la descarga del acumulador. Es preciso señalar aquí que, por las razones expuestas, la capacidad real de un acumulador LiPo es inferior a la teórica: la capacidad contenida por el acumulador en la zona de la gráfica recuadrada en gris no llega nunca a aprovecharse. Así, para una utilización segura de un acumulador LiPo, nunca se utilizará más del 70-80% de su capacidad teórica.

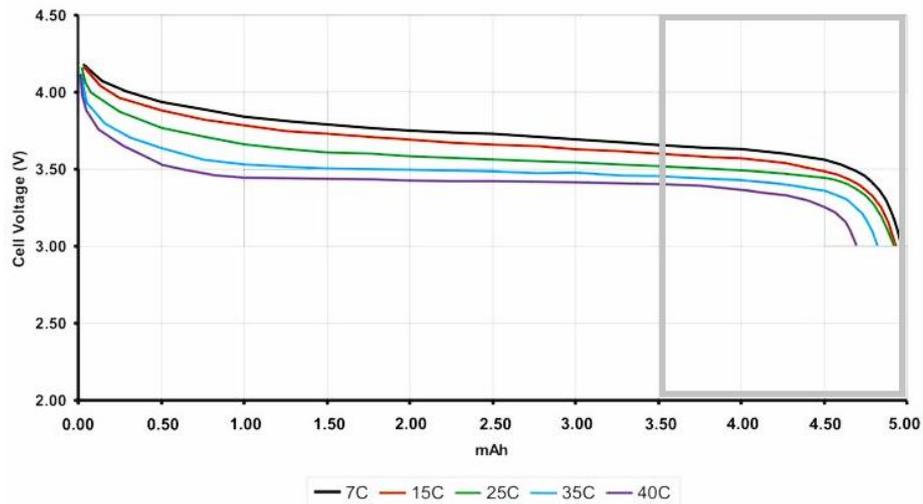


Figura 4. Curva de descarga de un acumulador LiPo de la marca Thunder Power RC, de 5000mAh de capacidad y 40C de tasa de descarga constante [10]

Una batería de acumuladores LiPo debe contar necesariamente con un sistema de balanceo, ya que las diferentes celdas o células que la componen no son idénticas: sus capacidades pueden variar con los diferentes ciclos de carga y descarga, aunque inicialmente todas tengan la misma capacidad. De esta forma, la celda de menor capacidad se convierte en el eslabón débil de la batería, ya que estará totalmente cargada mientras que las demás no lo estarán. En ese momento, la carga debe interrumpirse para evitar la destrucción de la celda de menor capacidad, a pesar de que el resto de células no estén del todo cargadas. Esto limita lógicamente la energía que se puede extraer de la batería, así como la que se puede inyectar. [11]

El balanceado maximiza la capacidad de la batería, protegiendo la celda de menor capacidad. Así, el balanceado permite la continuación de la carga del resto de células, a pesar de que la de menor capacidad esté completa (respectivamente, el balanceado permite la continuación de extracción de carga del resto de células, a pesar de que la de menor capacidad esté descargada). Para conseguirlo, el sistema de balanceo puede transferir energía entre las diferentes celdas de la batería, hasta que todas alcancen el mismo estado de carga⁶. Esta transferencia de energía entre celdas es característica de los sistemas de balanceo activos, los más comunes. Sin embargo, existen otros sistemas de balanceo llamados pasivos, ya que la energía excedente de la célula (o células) de mayor estado de carga se convierte en calor, normalmente a través de resistencias. [12][13]

⁶ El estado de carga de un acumulador, también conocido como SOC (State of Charge), expresa la carga contenida por el mismo en relación a su capacidad (100% cuando el acumulador está totalmente cargado, 0% cuando está totalmente descargado). En estos casos, es necesario recordar que el estado “totalmente descargado” corresponde a una tensión del acumulador de 3.5V.

El balanceo puede realizarse por medio de un PCM (Protection Circuit Module). Originalmente el PCM se concibe para proteger una celda individual de tensiones excesivas e insuficientes, con una tolerancia de 10 a 20mV. Los valores límites por defecto son de 4.3V y 2.6V respectivamente, con posibilidad de modificación en algunos modelos. Además, el PCM también protege a la celda de una corriente de salida excesiva (más del 40% de la corriente de salida nominal). [13] Si en vez de una celda independiente quisiera protegerse una batería de acumuladores, los límites de tensión deberían modificarse, por ejemplo a 25.2V y 21V en el caso de una batería 6S1P⁷. Sin embargo, esta protección sería del todo ineficaz si no se acompaña de un sistema de balanceo. Por ello, existen PCMs adaptados a la protección de baterías, que incluyen la posibilidad de balancear pasivamente las celdas, además de controlar la corriente de salida y los valores inadecuados de tensión. Desgraciadamente, la compra de un PCM balanceador de calidad resultaría demasiado caro para el presupuesto de la *Boombbox*. Existen PCMs balanceadores a precios asequibles en eBay [14], Alibaba [15] o Battery Space [16][17], pero no resultan interesantes al no permitir la modificación de los valores límites de tensión, no poder balancear más de cuatro células, y no proporcionar información detallada sobre las características técnicas del producto.

Otra opción de protección y balanceo combinados la ofrece el BMS (Battery Management System), especialmente recomendado para baterías de más de 20 celdas, ya que incluye más funcionalidades que un PCM. Así, el BMS no sólo balancea activamente las células, sino que también sigue en tiempo real la tensión, corriente y temperatura de cada una de ellas, y de la batería en su conjunto. Además, el BMS almacena las medidas y calcula otros datos relevantes a partir de ellas, como el tiempo restante de utilización de la batería. Cuando el BMS se conecta a un bus de comunicación externa se conoce como un SMS (Smart Battery System). [18][19] Tanto el BMS como el SMS son excesivamente caros para un coste de producción final de la *Boombbox* de 400€, por lo que queda descartado su uso en la aplicación. Además, la batería no tendría en ningún caso veinte celdas, ya que menos de diez son sobradamente suficientes para cumplir los requisitos exigidos por los amplificadores en términos de alimentación.

Una última alternativa para balancear las celdas de una batería pasa por el cargador. En la práctica, no es necesario un balanceo continuo, sino que basta con balancear la batería una vez cada cinco ciclos de carga-descarga. Por esta razón, abundan en el mercado los cargadores que balancean la batería al tiempo que la cargan, mencionándose un ejemplo concreto de los mismos en la siguiente sección.

⁷ La notación 6S1P hace referencia a seis celdas conectadas en serie. Si hubiera por ejemplo dos celdas conectadas en paralelo, la notación correspondiente sería 1S2P. En caso de conectar en serie dos baterías 1S2P, se obtendría una batería 2S2P.

3.3. PRINCIPIOS DE CARGA Y CARGADORES

En teoría, las células de litio se cargan a tensión constante. Así, la intensidad inicial que se instala es aproximadamente la diferencia entre la tensión aplicada y la tensión inicial en bornes, dividida por la resistencia interna. A medida que el acumulador se completa, la velocidad de carga disminuye, ya que aumenta la tensión interna de la celda y consecuentemente la intensidad disminuye. En la práctica, si la tensión aplicada fuera la máxima (4.2V) la intensidad resultante sería demasiado elevada, por lo que la carga de un acumulador se realiza a tensión variable. Así, se aplica inicialmente una tensión inferior a la máxima que se aumenta poco a poco hasta alcanzar los 4.2V, con fin de mantener la intensidad constante. A partir de entonces, se conserva la tensión constante a 4.2V, disminuyendo paulatinamente la intensidad hasta alcanzar un valor previamente establecido (dependiente de la capacidad de la batería), momento en el que se considera que el acumulador está totalmente cargado. [20][21]

El proceso de carga de una batería LiPo juega un papel fundamental en la seguridad de utilización de la misma. Además de las condiciones mencionadas en la sección anterior sobre corriente de salida y tensiones límites, hay otros dos parámetros claves a tener en cuenta para asegurar una carga y un uso seguros: la temperatura y la corriente de entrada, típicamente controlados por el cargador. Generalmente se considera que la tasa de carga constante máxima debe ser igual a 1C, para cualquier batería. Es decir, si se tuviera por ejemplo una batería de 5000mAh la intensidad máxima que se podría inyectar continuamente a la batería para su carga sería de 5A. En cuanto a la temperatura, se recomienda no superar los 60°C, pero esto muy raramente genera problemas si la tasa de carga es la adecuada. [22]

En cuanto a los cargadores disponibles en el mercado, prácticamente la totalidad de los mismos ofrecen la función de balanceo hasta un máximo de seis a ocho celdas, sirven para una pluralidad de baterías de diferentes naturalezas químicas, configuraciones de celdas y capacidades, y tienen un precio alrededor de los 45€. Un ejemplo típico de cargador puede encontrarse en HobbyKing. [23] Sin embargo, este tipo de cargadores no se adaptan al posicionamiento de la *Boombox*, por las siguientes razones:

- Se trata de cargadores “universales”, es decir, de cargadores que requieren que el usuario introduzca las especificaciones técnicas de la batería. Así, en cada carga el usuario debe escoger el tipo de batería a cargar (Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion o LiPo), su configuración interna (número de celdas en serie y en paralelo con la notación xSyP), la corriente de carga deseada, y si se prefiere una carga simple o una carga con balanceo. Lógicamente, este proceso de introducción de datos no está en absoluto adaptado al posicionamiento de alta calidad de la *Boombox*: en el mejor

de los casos supone una molestia para el usuario entendido, entrañando riesgos de seguridad considerables para el usuario no informado en el peor de los casos.

- Segundo, este tipo de cargadores son demasiado caros para el presupuesto del sistema íntegro de alimentación. Además, hay que tener en cuenta que normalmente los cargadores no pueden conectarse directamente al enchufe ordinario, por lo que habría que añadir el precio del adaptador necesario al precio inicial del cargador. Para una visión más detallada del reparto de costes del sistema de alimentación puede consultarse la sección 6.2.

3.4. CONCLUSIONES

El capítulo actual cubre el estudio de los sistemas de alimentación de cajas acústicas similares a la *Boombox*, la evaluación de las diferentes posibilidades en términos de baterías y cargadores, y el breve recorrido por los principios teóricos del balanceo, seguridad y carga de las baterías. Del estado de la técnica concerniente al marco de este proyecto, pueden extraerse dos consecuencias principales.

Primero, el acumulador más adaptado a la aplicación *Boombox* es el de polímero de litio (LiPo), siendo la elección de la batería óptima el objeto del capítulo 4.

Segundo, por motivos de calidad y precio de la *Boombox*, no resulta razonable la compra de un sistema de protección balanceador ni la compra de un cargador balanceador. Por ello, es necesaria la concepción y el desarrollo de un sistema de carga adaptado a la batería escogida, que esté a la vez sujeto a las imposiciones de seguridad, a los principios de carga de los acumuladores LiPo y a la obligatoriedad del balanceo de las celdas. Ello ocupará los capítulos 5 y 6 de este documento.

4. BATERÍA DE POLÍMERO DE LITIO

Los requisitos de la batería, en términos de tensión nominal y de corriente constante proporcionada, vienen casi exclusivamente definidos por la cantidad, clase y modelo concreto de amplificadores presentes en la caja acústica. La voluntad de una autonomía de al menos 7h y las limitaciones de precio y peso terminan de precisar las características técnicas de la batería ideal para la *Boombox*.

Tras el estudio de diferentes tipos de amplificadores y varios ensayos acústicos, la opción amplificadora elegida consiste en tres amplificadores idénticos de clase D (concretamente, el modelo TDA7498 de la marca SURE). El análisis de sus características técnicas y las condiciones de alimentación en los ensayos acústicos revelan la necesidad de una tensión nominal de 15V y una corriente de entre 560mA y 700mA, dependiendo del volumen. A pesar de que la configuración 5S1P (tensión nominal de 18.5V) de la batería podría parecer la más adaptada en un primer momento, la configuración final escogida es la 6S1P (tensión nominal de 22.2V), con fin de evitar una limitación de potencia a la hora de un elevado consumo instantáneo.

Así, la batería LiPo elegida [24] tiene efectivamente seis células en una configuración de 6S1P, proporcionando por tanto una tensión comprendida entre 21V y 25.2V. La capacidad es de 5000mAh, con una tasa de descarga constante de 20C. La batería pesa 765g y mide 14.5x5x5cm, por lo que está bien adaptada a la portabilidad deseada de la *Boombox*. Además de los dos cables de polaridad, incluye un adaptador que permite acceder a las conexiones internas entre célula y célula, requisito imprescindible para el balanceado. Finalmente, su precio es sólo de 38.41€, y está disponible en la web HobbyKing.

De esta forma, la batería responde a los requisitos de tensión de alimentación, precio y peso. Por su parte, las horas de autonomía e intensidad deseadas quedan aseguradas por la capacidad y tasa de descarga elegidas. En efecto, la tasa de descarga de 20C es sobradamente suficiente para la aplicación aquí expuesta (el consumo pico de la caja acústica nunca sobrepasará los 100A), mientras que la capacidad de 5000mAh permite entre 7.142h y 8.93h teóricas de autonomía (resultado de la división de 5000mAh entre 700mA y 560mA respectivamente).

Antes de concluir este apartado, resulta lícito preguntarse sobre la posibilidad de comprar por separado seis células LiPo y constituir posteriormente la batería a mano, conectando las seis células en serie. Pese a lo que podría parecer, no es una solución más barata [25][26][27], ya que suelen venderse al por mayor a empresas especializadas en baterías, por lo que el precio unitario es elevado. Además, existen pocas células

individuales de la capacidad necesaria para la *Boombbox*, y la soldadura manual de las células en serie conlleva un riesgo al no tener todas las células una capacidad idéntica.

5. CONCEPCIÓN DEL CIRCUITO DE CARGA

5.1. INTRODUCCIÓN

La concepción del circuito de carga constituye el núcleo central de este proyecto. Su dificultad y atractivo no residen únicamente en el diseño de un circuito teórico funcional, sino también en la elección correcta de los componentes necesarios para ello, teniendo lógicamente en cuenta sus límites de funcionamiento. En la sección 6.2 se puede consultar la lista exhaustiva de componentes, junto con sus respectivos precios y proveedores. Pese a ser fundamentales para la correcta concepción del circuito, las fichas técnicas de los diferentes componentes no se incluyen en este documento, ya que pueden encontrarse sin problema en los enlaces proporcionados en la sección 6.2.

Esta sección presenta el funcionamiento del circuito de carga final, cuyo esquema se muestra en la figura 5 de la siguiente página. Las diferentes partes que lo constituyen, recuadradas en negro en el esquema, se estudiarán en profundidad en las diferentes secciones de este capítulo, explicando su funcionamiento. La concepción del circuito de carga consiste en diseñar un sistema que permita la carga segura y el balanceado de la batería previamente escogida, siguiendo los principios de carga en dos tiempos y las limitaciones de tasa de carga y de temperatura. Así, se deberá proporcionar una corriente constante de alrededor de 3A hasta que la batería alcance su tensión máxima de 25.2V. Una vez se alcance dicho valor, el circuito deberá mantener constante la tensión, hasta que la corriente de la batería sea inferior a 50mA. En paralelo, el circuito deberá vigilar las tensiones individuales de las células e interrumpir temporalmente la carga si la diferencia de tensión entre ellas supera los 0.1V. En ese momento, la célula más cargada disipará su exceso de energía pasivamente a través de resistencias.

El circuito de carga no está encendido en permanencia, sólo cuando el usuario decide voluntariamente conectar la caja a una alimentación eléctrica para su carga o balanceado. De esta forma, el encargado de la importantísima funcionalidad del apagado automático de la caja en caso de batería baja no es el circuito de carga, sino el circuito de control principal de la caja acústica, quien vigila continuamente la tensión total de la batería.

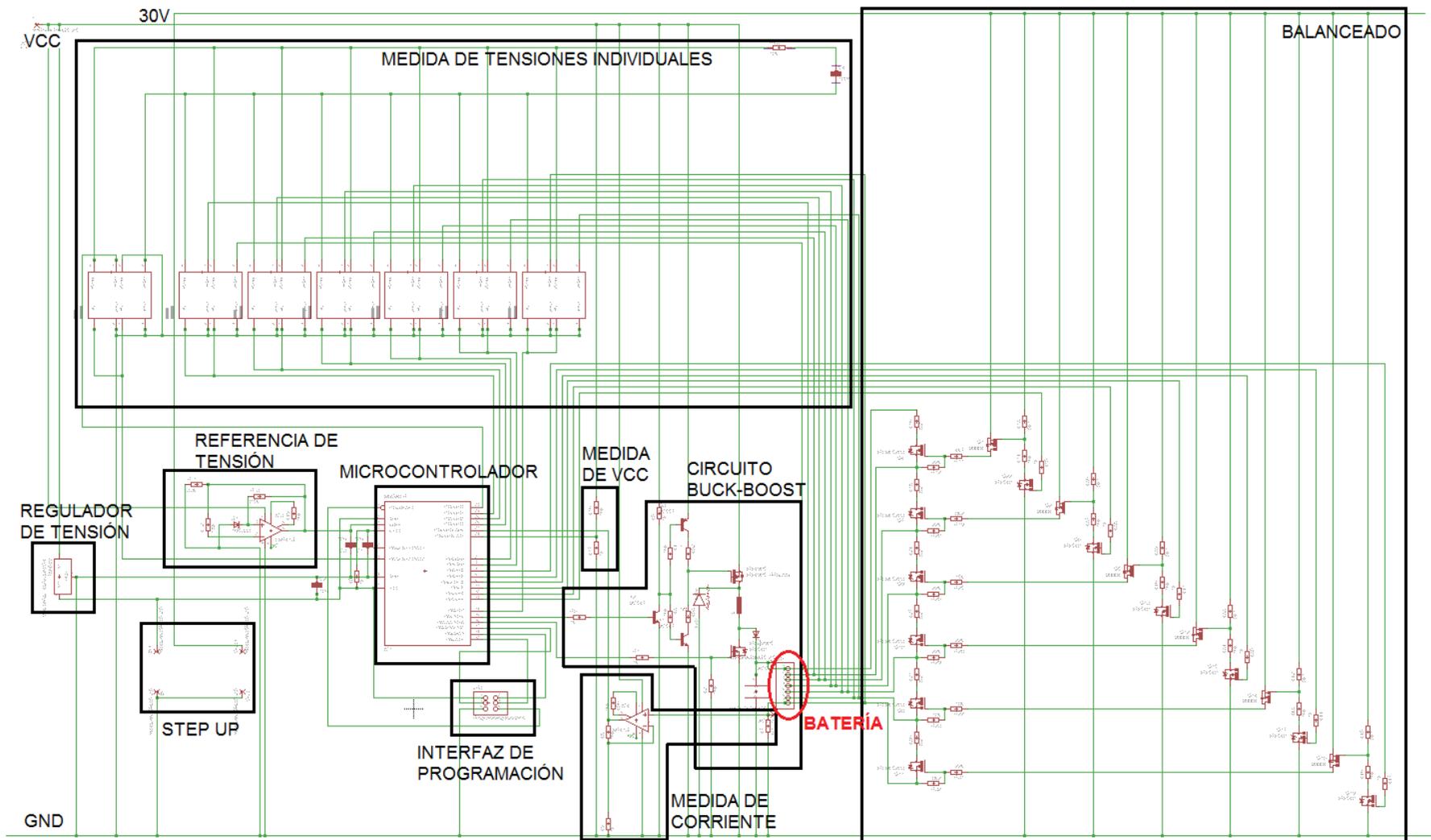


Figura 5. Esquema completo del circuito de carga

5.2. ALIMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE CARGA

El circuito está concebido de forma que la tensión de alimentación VCC no tenga por qué ser igual a un único valor. Así, el circuito funciona para una tensión VCC comprendida entre 12V y 30V. Esto permite al usuario una mayor portabilidad, al ampliar el abanico de posibilidades de carga de la caja acústica, pudiéndose cargar la *Boombox* en un automóvil⁸, por ejemplo. Para una carga clásica a través de un enchufe, la tensión VCC será proporcionada por un cargador de ordenador portátil comprado en eBay, de tensión e intensidad nominales de 19.5V y 4.7A respectivamente. Esta intensidad es ligeramente inferior al valor típico de intensidad de carga de 5A para la batería escogida. El hecho de cargar la batería a una tasa de carga inferior a 1C permite asegurar que la temperatura no excede la temperatura máxima de seguridad. La tasa de carga real estará en torno a los 0.6C, ya que la intensidad de carga no superará los 3A debido a limitaciones de la bobina del circuito buck-boost en cuanto a picos de intensidad máxima soportada (ver sección 5.3). Lógicamente, una tasa de carga inferior a la ideal implica un tiempo de carga de la caja acústica superior. El valor concreto real es difícilmente estimable sin acceso a la curva de carga específica de la batería comprada, pero posiblemente se sitúe alrededor de las cinco horas.

Tal y como se verá más adelante (sección 5.4), la parte del circuito de carga responsable del balanceado de la batería necesita una tensión de alimentación constante de 30V. Es por ello que se justifica la presencia del elevador de tensión llamado “step up” en la figura 5. Este circuito externo, también comprado en eBay, permite obtener una tensión a su salida de entre 5V y 35V, ajustable mediante un potenciómetro, a partir de una tensión de entrada de entre 3V y 32V. Para esta aplicación, el potenciómetro está siempre fijo en una posición tal que proporcione a su salida los 30V necesarios para el balanceado, para una tensión de entrada de 5V. Dicha tensión es proporcionada por un regulador de tensión 7805, quien otorga 5V a su salida para cualquier tensión de entrada comprendida entre 7.5V y 35V. Así, al estar la tensión VCC comprendida entre 12V y 30V, el regulador asegura una tensión de 5V para todas las posibilidades de carga.

La razón de trabajar con un valor de 5V y no con otro cualquiera se debe a las características del microcontrolador ATMEGA168PA, quien necesita típicamente una tensión de alimentación de 5V ($\pm 0.25V$) para su correcto funcionamiento. La figura 6 muestra las conexiones necesarias para la alimentación del mismo. El condensador C2 de 10 μ F conectado a la salida del regulador de tensión asegura una tensión $V_{CC} = 5V$ más estable al microcontrolador (pin 7). Además, el microcontrolador necesita otras dos señales de entrada: AREF (pin 21) y AV_{CC} (pin 20).

⁸ La tensión proporcionada por la toma de mechero de la gran mayoría de automóviles es de 12V.

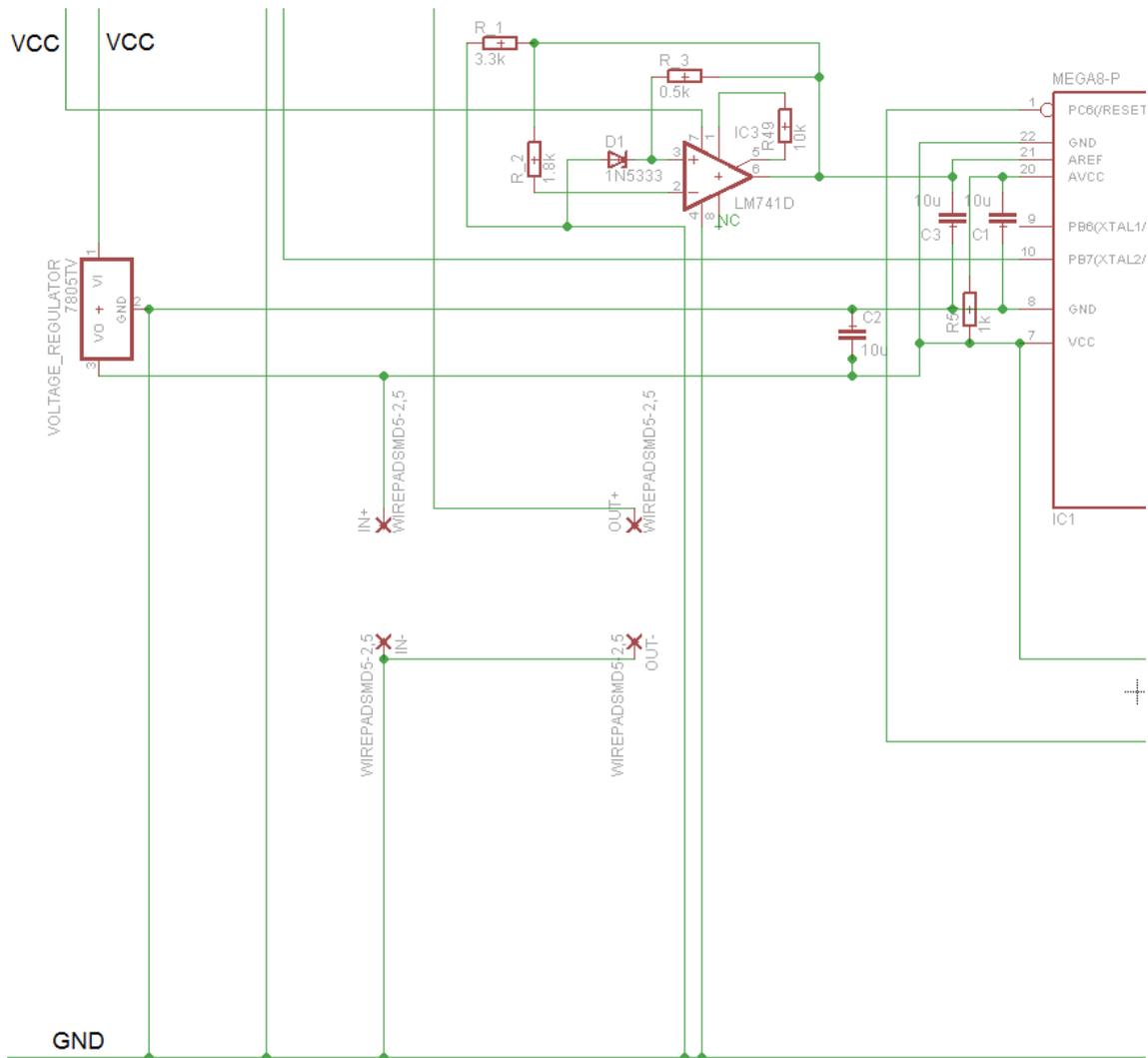


Figura 6. Detalle de la alimentación del circuito de carga

AV_{CC} es la entrada de alimentación independiente del convertidor analógico-digital o ADC. La hoja de datos del microcontrolador estipula que AV_{CC} deber estar siempre conectada a V_{CC} , incluso si no va a utilizarse el convertidor. De utilizarse, como es el caso de esta aplicación, es preciso realizar la conexión a través de un filtro de paso bajo. Aquí se ha optado por un simple filtro RC (ver figura 7), constituido por el condensador C1 de $10\mu\text{F}$ y la resistencia R5 de $1\text{k}\Omega$, lo que da una frecuencia de corte ω_c de 100.

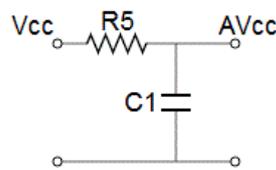


Figura 7. Conexión de V_{CC} y AV_{CC} mediante un filtro paso bajo

Por su parte, AREF espera una tensión de referencia analógica sobre la cual basar las medidas de tensión, convirtiéndolas en valores digitales siguiendo la expresión $V_{medida} \cdot 1024 / AREF$. No debe diferir de la tensión de alimentación V_{CC} en más de 0.5V, por lo que idealmente deberá tener un valor constante situado entre 4.5V y 5.5V. Con motivo de obtener una tensión de referencia más estable, se ha utilizado un amplificador operacional LM741 y un diodo Zener 1N5333, conectados en la configuración mostrada en la figura 8. El diodo escogido tiene una tensión V_Z de 3.3V, por lo que la relación entre R_2 y R_1 deberá ser de 17 a 33 para obtener una AREF de 5.1V. Así, R_1 tiene un valor de $3.3k\Omega$ y R_2 un valor de $1.8k\Omega$. El condensador C_3 de $10\mu F$ no sería del todo necesario, pero contribuye a que AREF sea perfectamente estable. La resistencia R_3 presente en el circuito de carga simplemente limita la intensidad que circula por el diodo, mientras que la resistencia R_{49} de $10k\Omega$ anula el offset del operacional. La alimentación de este se realiza entre V_{CC} y tierra, por lo que dependiendo del valor de V_{CC} variará entre 12V y 30V. Esta tensión se adapta bien a las condiciones de uso del operacional, funcional para una tensión de alimentación de hasta 44V.

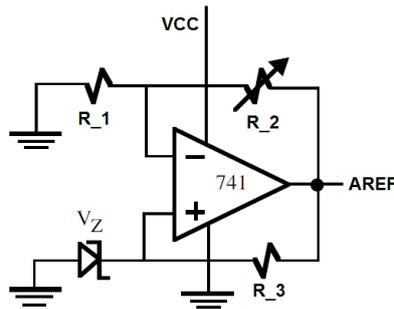


Figura 8. Obtención de una referencia de tensión AREF regulada [RUIZ01]

5.3. CIRCUITO BUCK-BOOST

La figura 9 muestra más en detalle la parte del circuito de carga correspondiente al circuito buck-boost. La denominación de "buck-boost" simplemente hace referencia a la doble funcionalidad del circuito: reductor (*buck* en inglés) o elevador (*boost* en inglés) de tensión. El circuito se comporta de una manera o de otra en función del valor de la tensión de alimentación VCC, medida por el microcontrolador a través de las resistencias R16 y R17. Para entender mejor el funcionamiento del circuito de carga, se presenta a continuación el funcionamiento de un circuito buck-boost genérico, cuyo esquema se encuentra representado en la figura 10.

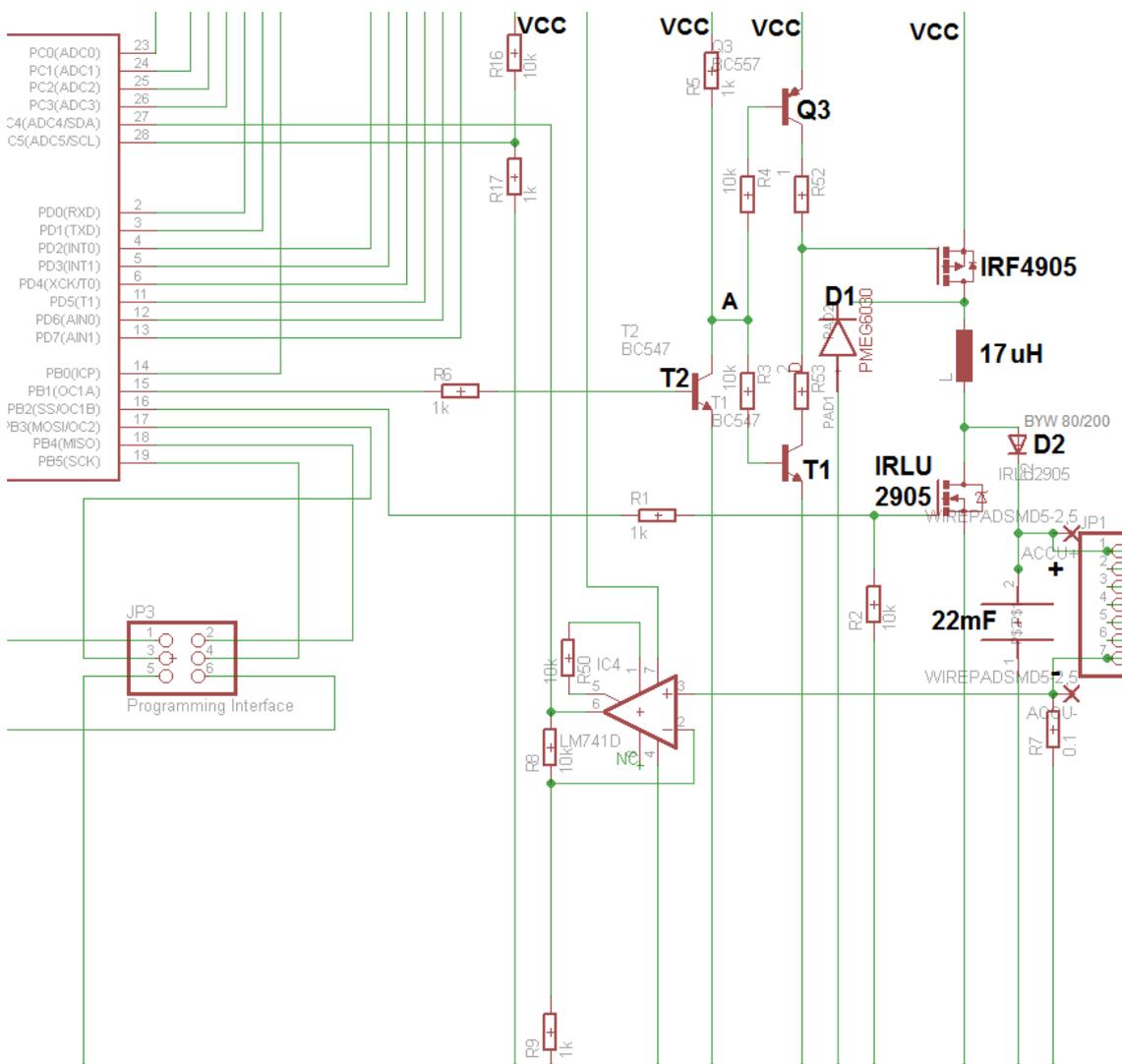


Figura 9. Detalle del circuito buck-boost del sistema de carga de la caja acústica

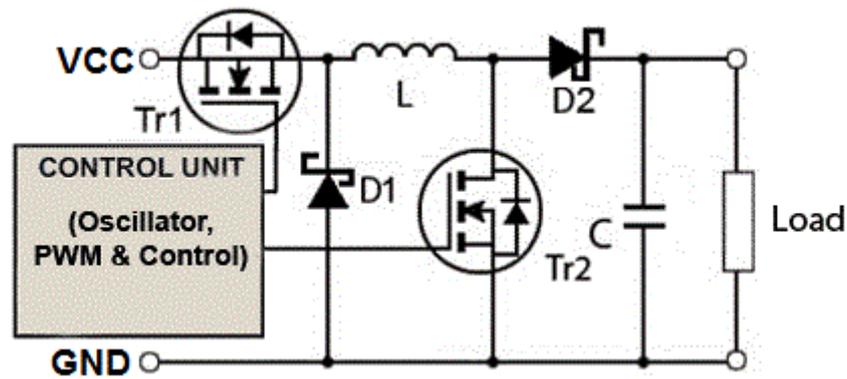


Figura 10. Esquema de un circuito buck-boost genérico [28]

El circuito buck-boost genérico anterior está compuesto por dos conmutadores de alta frecuencia (mosfets Tr1 y Tr2), dos diodos D1 y D2 (de tipo Schottky en el esquema), una bobina L, un condensador C, y una carga "load", cuya tensión V_{out} se quiere controlar. Se comprueba fácilmente por comparación de las figuras 9 y 10 que el mosfet IRF4905 se asocia a Tr1, el mosfet IRLU2905 a Tr2, el diodo PMEG6030 a D1, el diodo BYW80/200 a D2, la bobina de $17\mu\text{H}$ a L, el condensador de 22mF a C, y la batería en serie con la resistencia R7 a la carga o "load".

¿Cómo se controla la conmutación de los transistores del circuito buck-boost?

Antes de presentar el doble funcionamiento del circuito buck-boost, es interesante precisar la forma en la que se controla la conmutación de los mosfets Tr1 y Tr2, utilizados únicamente en las zonas de corte y de saturación, nunca en zona lineal. La unidad de control recuadrada en gris en la figura 10 representa las dos señales PWM responsables de la conmutación de los mosfets. Las siglas PWM (*Pulse-Width Modulation* en inglés) corresponden a la técnica conocida en español como modulación por ancho de pulsos. De esta forma, el microcontrolador controla el corte y saturación de cada mosfet gracias a una señal cuadrada de alta frecuencia, de ciclo de trabajo D^9 . Así, cuando la señal está HIGH el mosfet estará saturado (equivale a un interruptor cerrado), mientras que cuando la señal está LOW el mosfet estará en corte (equivale a un interruptor abierto). Para el microcontrolador ATMEGA168PA, la frecuencia de la señal PWM es de 31.25kHz , resultado de dividir la frecuencia del reloj interno de la CPU (8MHz) entre 256. Aquí se ve el interés de la utilización de transistores mosfets como componentes de conmutación, ya que el periodo de señal de $32\mu\text{s}$ requiere una velocidad muy rápida de conmutación. En el caso de los mosfets IRF4905 e IRLU2905 el tiempo de conmutación

⁹ El ciclo de trabajo D de una señal periódica se define como el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. [29]

varía entre los 50ns y los 90ns para el encendido y apagado respectivamente, por lo que ambos están bien adaptados al funcionamiento esperado del circuito.

Para controlar la conmutación del mosfet IRLU2905, de tipo N, es suficiente con el divisor de tensión a la salida del pin 15 (resistencias R1 y R2), ya que su $V_{GS(Th)}$ varía entre 1V y 2V, y el surtidor S se ha conectado a tierra. Sin embargo, para controlar la conmutación del mosfet IRF4905, de tipo P, es necesaria una tensión de al menos 10V en su compuerta G, para asegurar que la tensión V_{GS} nunca es inferior a -20V. De haber una tensión inferior a 10V en G, la diferencia de tensión entre la compuerta y el surtidor sería excesiva y el mosfet no lo soportaría. Para conseguir la tensión mínima necesaria, se recurre al transistor T2 (BC547C), cuyo colector se conecta a la resistencia R5 de 10k Ω para no sobrepasar la intensidad máxima soportable del componente. Sin embargo, la compuerta G del mosfet IRF4905 no puede conectarse directamente a este punto (llamado A en la figura 9), ya que entonces su velocidad de conmutación no sería suficiente. Es por ello que los transistores T1 (BC547B) y Q3 (BC557A) son necesarios.

De esta forma, cuando el transistor npn T2 se encuentra en corte, es decir, cuando la señal PWM del pin15 esté momentáneamente en LOW, el punto A tendrá una tensión muy cercana a VCC, por lo que el efecto del transistor pnp Q3 será despreciable frente al efecto del transistor npn T1. Así, la elevada corriente que circulará desde el colector hasta el emisor en T1 descargará casi instantáneamente el mosfet IRF4905, consiguiendo una transmisión suficientemente rápida de la señal de control. De manera análoga, cuando el transistor npn T2 se encuentra en saturación, es decir, cuando la señal PWM del pin 15 esté momentáneamente en HIGH, el punto A tendrá una tensión prácticamente nula, por lo que el efecto del transistor npn T1 podrá despreciarse frente al efecto del transistor pnp Q3. En realidad, en este caso el transistor T1 no tendrá ningún efecto, ya que la tensión $V_{BE(ON)}$ de 0.7V necesaria para su encendido no se alcanzará. Así, la elevada corriente que circulará desde el emisor hasta el colector en Q3 cargará casi instantáneamente el mosfet IRF4905.

Las resistencias de 1k Ω (R6) y de 10k Ω (R3 y R4) tienen por función la limitación de la intensidad en la base de los transistores T2, T1 y Q3 respectivamente. Por su parte, las resistencias R52 de 1 Ω y R53 de 2 Ω son necesarias para que no se supere la tensión máxima $V_{GS} = \pm 20V$ del mosfet IRF4905.

¿Cómo funciona el circuito buck-boost?

Debido a los abundantes estudios teóricos sobre el funcionamiento de los circuitos *buck* y *boost* por separado, esta sección presenta su funcionamiento desde un punto de vista más cualitativo. El lector interesado puede referirse a [ROGE99_1] y a [ROGE99_2] respectivamente para el estudio de las fórmulas que se utilizan en este apartado, para lo que es necesario un análisis profundo de la evolución de la intensidad y de la tensión en cada componente de los dos circuitos: Tr1, D1, L, C y "load" para el

circuito *buck*; y Tr2, D2, L, C y "load" para el circuito *boost*. Combinando ambos en un circuito único de tipo buck-boost se obtienen las fórmulas siguientes, claves para la correcta elección de la bobina, condensador y diodos:

$$L > \frac{D * V_{IN} * (1 - D)}{f_{Cycle} * 2 * I_{OUT}}$$

$$I_{L \text{ Max}} = \frac{V_{IN} * D}{f_{Cycle} * L1}$$

$$C > \frac{I_{OUT}}{V_{Ripple} * f_{Cycle}}$$

Así, para una $f_{Cycle} = 31250\text{Hz}$, una V_{IN} de 12 a 30V, una V_{OUT} de 21.3 a 25.5V¹⁰, una $I_{OUT} = 3\text{A}$ y un rizado máximo de $V_{Ripple} = 0.005\text{V}$, obtenemos que:

- La bobina L deberá tener una inductancia mínima de 16 μH , debiendo ser capaz de soportar un pico de corriente de 13A. Se ha escogido una corriente de carga de 3A por representar un compromiso entre el tiempo de carga de la caja acústica y la corriente máxima a soportar por la bobina, ya que hay que tener en cuenta que las bobinas capaces de soportar una gran corriente son relativamente caras y voluminosas. Finalmente, se ha decidido utilizar una bobina de 17 μH .
- El condensador C deberá ser al menos de 19mF. Este valor tan grande se explica por el comportamiento del circuito *boost* cuando la señal PWM de control del Tr2 está HIGH: el condensador está directamente conectado a la carga, y es el único responsable de su alimentación. Ello implica que el rizado de V_{OUT} será importante. Al haber fijado un valor de rizado máximo de 5mV, el condensador deberá forzosamente tener una gran capacidad. Finalmente, se ha decidido utilizar un condensador de 22mF.
- En la elección del diodo D1, el requisito principal es que éste sea capaz de soportar 3A con la mínima caída de tensión posible. Con tal fin, se ha escogido el diodo PMEG6030. En la elección del diodo D2, la intensidad máxima a soportar debe ser considerablemente mayor (al menos de 13A), y la velocidad de conmutación debe ser muy elevada si se quiere que el circuito sea eficiente. En consecuencia, se ha escogido el diodo BYW80-200, por su capacidad de soportar corrientes pico de hasta 16A y por su tiempo de recuperación de 35ns.

¹⁰ El intervalo de tensiones de la carga estará compuesto por la suma del intervalo de tensiones de la batería (21.6, 25.2) V con la tensión correspondiente a la resistencia R7 en serie con la batería.

El circuito buck-boost se comporta como un circuito reductor de tensión usual (*buck*) si la tensión VCC es superior a la necesaria para la carga de la batería. La figura 10 ilustra la circulación de intensidad en este caso. El microcontrolador sólo envía una señal PWM al mosfet Tr1, y así el Tr2 no interviene en el circuito *buck*, al no salirse nunca de su zona de corte. Cuando la señal está HIGH, la intensidad alimenta la carga o "load", cargando a su vez la bobina y el condensador. Cuando la señal está LOW, la bobina se convierte en fuente de alimentación con objeto de alisar su intensidad, alimentando así a la carga con la ayuda progresiva del condensador. El ciclo de trabajo D, es decir, la proporción entre los tiempos HIGH y LOW de la señal PWM, definirá la tensión de la carga según la relación $D = V_{out} / (V_{out} - V_{CC})$.

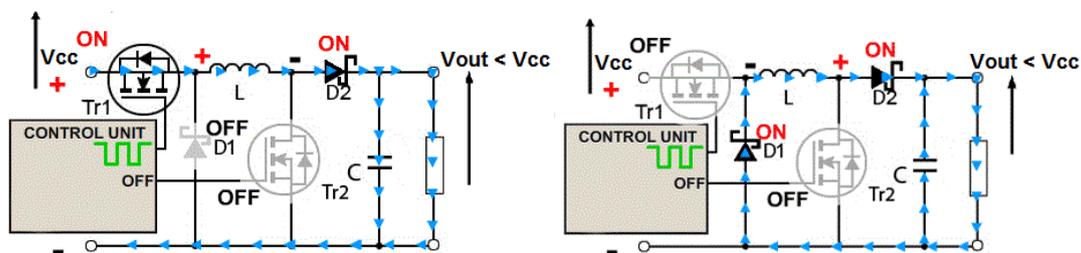


Figura 11. Circuito buck genérico HIGH (izquierda) y LOW (derecha) [28]

Cuando la tensión VCC no es lo suficientemente elevada para cargar la batería (como por ejemplo en el caso de la carga de la caja acústica en un automóvil), el circuito se comporta como un circuito elevador de tensión usual (*boost*). La figura 12 ilustra la circulación de intensidad en este caso. El microcontrolador hace que el Tr1 se encuentre permanentemente en saturación, enviando una señal PWM únicamente al Tr2. Cuando la señal está HIGH, la bobina almacena energía, y al estar D2 apagado, la batería se carga gracias al condensador. Cuando la señal está LOW, la bobina se convierte en fuente de alimentación, cargando así el condensador y alimentando la carga. Al igual que en el circuito *buck*, el ciclo de trabajo definirá la tensión de la carga, siguiéndose en este caso la expresión $D = 1 - V_{CC}/V_{out}$.

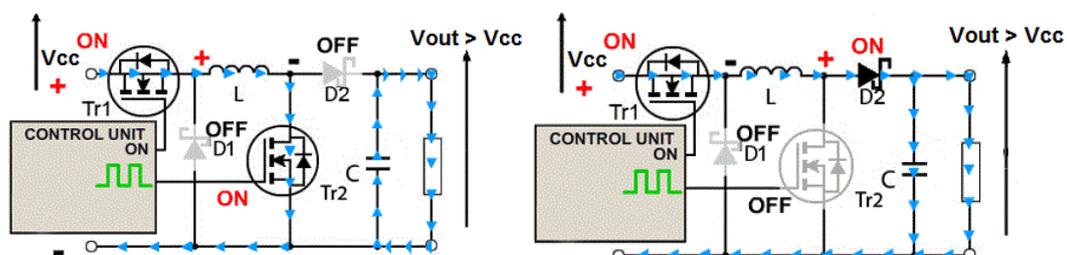


Figura 12. Circuito boost genérico HIGH (izquierda) y LOW (derecha) [28]

Lógicamente, el microcontrolador variará el ciclo de trabajo de la señal PWM (ya sea en funcionalidad *buck* o *boost*) en función de las medidas obtenidas de intensidad y tensión de la carga. En un primer tiempo, la magnitud de control será la intensidad, ya que al principio el circuito debe cargar la batería a intensidad constante. Así, si la intensidad medida es inferior a la intensidad de carga constante estipulada, el microcontrolador aumentará D . Con ello se aumentará la tensión de la carga, y, consecuentemente, la corriente que la atraviesa. De ser la intensidad medida superior al valor fijado, el microcontrolador disminuirá D hasta conseguir reducir la intensidad a su valor requerido. Globalmente, este proceso de tanteo de la intensidad y de cambios del ciclo de trabajo de la señal PWM implica un aumento progresivo de la tensión de la batería (por la progresiva carga de la misma), hasta llegar a los 25.2V.

Una vez alcanzada esta tensión máxima de 25.2V¹¹, la magnitud de control pasará a ser la tensión. Así, el microcontrolador medirá continuamente la tensión de la carga. En el momento en que haya un mínimo aumento de la tensión, el microcontrolador disminuirá el ciclo de trabajo para así disminuir la intensidad de carga de la batería. Este proceso de tanteo de la tensión finalizará cuando la intensidad se vuelva inferior a 50mA, momento en el que se da por terminada la carga¹².

¿Cómo se efectúa la medida de la intensidad de la batería?

Posiblemente, el lector experimentado esté preguntándose el porqué de la resistencia $R7$ conectada entre la borna negativa de la batería y tierra, si idealmente la carga del circuito buck-boost debería estar únicamente constituida por la batería. La intensidad de la batería en este caso ideal debería medirse con un amperímetro de resistencia nula, conectado entre la borna negativa de la batería y tierra. Sin embargo, el microcontrolador real necesita una resistencia para la medida de intensidades, ya que sólo es capaz de medir tensiones, y una resistencia de valor conocido le ofrece una equivalencia directa entre intensidad y tensión dada por la ley de Ohm.

Para no perturbar el correcto funcionamiento del circuito buck-boost en tanto que cargador de la batería, la resistencia $R7$ es de 0.1Ω . Así, su máxima tensión será de 0.3V, valor casi despreciable en comparación a la tensión total de la batería. Para aumentar la precisión de la medida, la tensión de la resistencia $R7$ se amplifica gracias a

¹¹ El límite real impuesto al microcontrolador en el programa es algo inferior, para asegurar que en el proceso de tanteo de la tensión, en el segundo tiempo de carga, la batería no sobrepase su tensión máxima de seguridad de 25.2V.

¹² El programa del microcontrolador que controla la carga en dos tiempos (junto con la medida de tensiones e intensidad y las interrupciones para el balanceado de las células) ha sido implementado en C, en el programa Avr Studio.

la configuración no inversora del amplificador operacional 741 mostrada en la figura 9. Así, el pin 27 del microcontrolador mide la tensión de la resistencia multiplicada por la ganancia del amplificador, que en este caso se ha escogido de 11.

¿Cómo se efectúa la medida de la tensión de las células de la batería?

Cuando se trata de medir la tensión de las células de la batería, la idea más intuitiva consiste en la medida de la tensión de cada uno de los siete puntos intermedios con respecto a tierra (ver figura 13). Es suficiente con restar los valores obtenidos de la manera adecuada para calcular la tensión de cada célula. Por ejemplo, para calcular la tensión de la segunda célula empezando por arriba, habría que restar V_2 a V_1 . Sin embargo, este método acabaría por desequilibrar la batería, ya que las células más cercanas al polo negativo de la batería se descargarían más que las células más cercanas al polo positivo.

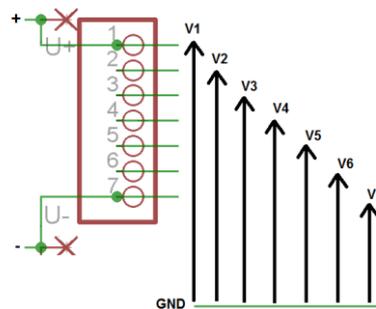


Figura 13. Medida de las tensiones de cada punto intermedio con respecto a tierra

Por la razón anterior, la medida de la tensión de cada célula debe realizarse de manera independiente de las demás. Para conseguirlo, se ha creado un dispositivo de medida secuencial de tensiones (nunca se mide la tensión de más de una célula a la vez) basado en siete optoacopladores EL827, una resistencia y un condensador, como se muestra en la figura 14. Cada una de las seis células de la batería está conectada a un optoacoplador. Estos, a su vez, están conectados a la resistencia R48 y al condensador C4, conectados en serie. Un séptimo optoacoplador (el situado más a la izquierda en la figura 14) se encarga de transmitir la medida al microcontrolador (a través del pin 10). Para entender cómo se realiza la medida, es importante comprender el comportamiento del optoacoplador, muy similar al de un relé o interruptor. La figura 15 muestra el esquema interno del optoacoplador elegido.

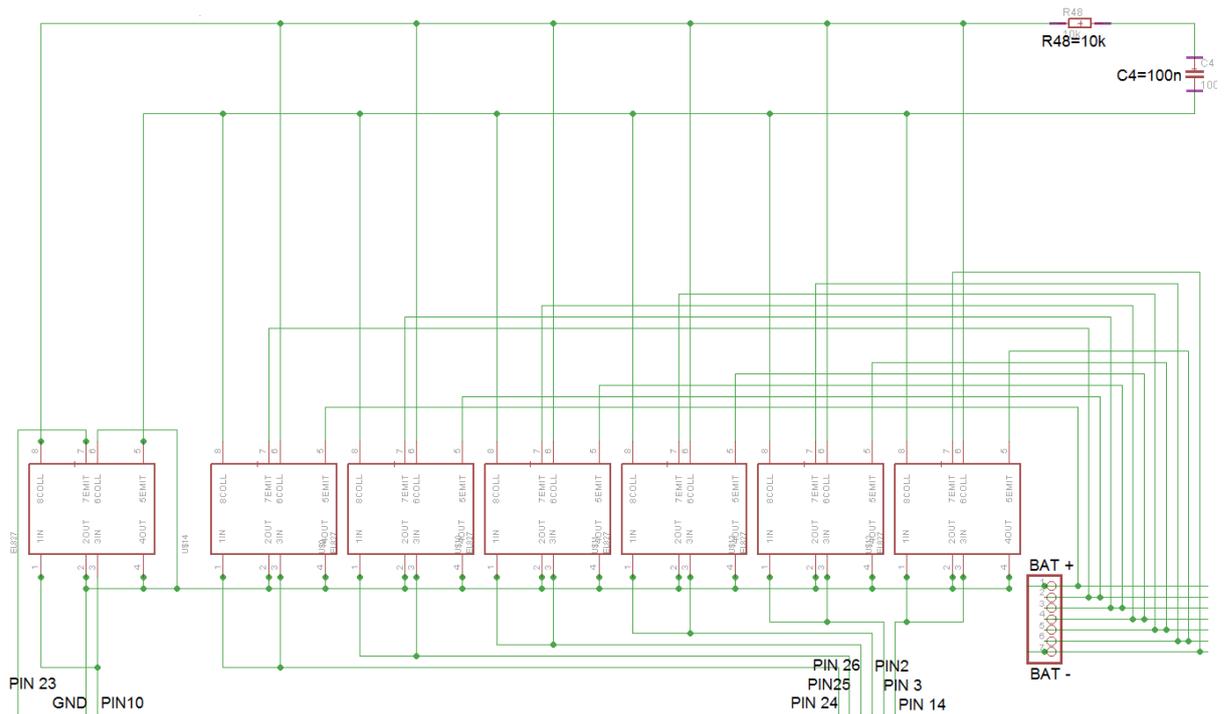


Figura 14. Detalle de la medida de tensiones de las células de la batería

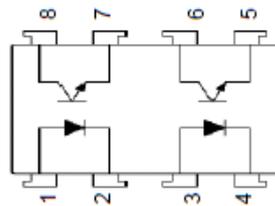


Figura 15. Conexiones internas del optoacoplador EL827

Por ejemplo, si se quisiera medir la tensión de la primera célula (la más próxima al extremo positivo de la batería), el microcontrolador pondría 5V en el pin de salida 24¹³. Esta señal, compartida para la conexiones internas 1 y 3 del optoacoplador, haría que los dos diodos de entrada del EL827 emitieran luz. Esto resultaría en la saturación de los dos transistores de salida del EL827, quedando así conectada la primera célula de la batería a R48 y C4. Instantes después, una vez que el condensador se encontrara en régimen permanente y su tensión fuera consecuentemente igual a la tensión de la primera célula, el microcontrolador pondría 0V en el pin 24, para desconectar la célula de la resistencia y el condensador. A continuación, el microcontrolador pondría a 5V el pin de salida 23.

¹³ Respectivamente, si se quisiera medir la tensión de la segunda célula, el microcontrolador pondría a 5V el pin de salida 25, y así sucesivamente: 5V en el pin 26 para la tercera célula; en el pin 2 para la cuarta; en el pin 3 para la quinta; y en el pin 14 para la sexta.

Esto saturaría los dos transistores del séptimo optoacoplador (el más a la izquierda en la figura 14), quedando así conectado el pin de entrada 10 del microcontrolador a R48 y C4.

La elección de R48 de 10kΩ se basa simplemente en la necesidad de limitar la corriente inicial que se instala en los transitorios. Sin embargo, para entender la elección de C4 hay que tener en cuenta la circuitería interna de los pines de entrada analógicos del microcontrolador (ver figura 16).

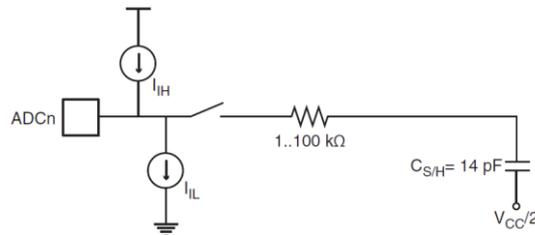


Figura 16. *Circuito interno de los pines de entrada analógicos del microcontrolador ATMEGA168PA*

Idealmente, el condensador C4 debería tener una capacidad cualitativamente pequeña, por dos razones. La primera, para reducir el tiempo de medida de la tensión de cada célula. El condensador necesita como mínimo un tiempo $t = 5 \cdot R \cdot C$ para cargarse, es decir, para igualar su tensión a la de la célula que se quiere medir. Así, a menor capacidad del condensador, mayor rapidez de medida. La segunda, para que la medida en sí no influya en el estado de carga de la célula. Si C4 fuera de gran capacidad, la igualación de su tensión a la tensión de la célula requeriría el traspaso de una cantidad de carga considerable de la célula al condensador. Ello modificaría el estado de carga inicial de la célula y la descargaría parcialmente. Sin embargo, para un correcto funcionamiento del dispositivo de medida, el condensador C4 está sujeto a un valor de capacidad mínima, condicionada por la capacidad del condensador C_{int} de la figura 17. Se trata de un problema clásico de conexión de dos condensadores (C4 y C_{int}) mediante una resistencia de 110 kΩ (100kΩ en serie con R48). Para no falsear la tensión medida a partir de la conexión con la célula (V_{real}) e igualar V_{med} a V_{real} , es preciso que el condensador C4 tenga una capacidad mucho mayor que 14pF. Tras aplicación numérica en las conocidas ecuaciones diferenciales se comprueba que 100nF es un valor adecuado para C4.

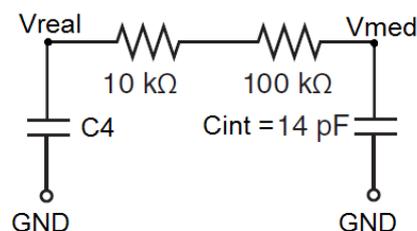


Figura 17. *Circuito resultante para la medida de la tensión del condensador C4*

5.4. BALANCEADO DE LA BATERÍA

El circuito de carga efectúa el balanceado de una forma pasiva. Es decir, las células con un estado de carga mayor que el resto se descargan mediante resistencias, sin existir traspaso de carga hacia las células de menor estado de carga. Si bien es cierto que el balanceado activo es el ideal por el aprovechamiento de la carga excedente de una célula para la carga del resto, su implantación resulta complicada en esta aplicación. La gestión de un balanceado activo requiere un circuito de control más complejo, lo que implica un mayor número de componentes y un mayor gasto. Las limitaciones del presupuesto del sistema de alimentación (cf. sección 6.2) han propiciado la concepción de un balanceado pasivo, menos eficiente que el activo, pero igualmente funcional y mucho más económico, ya que la suma de todos los componentes responsables del balanceado no supera los 6€.

La figura 18 muestra en detalle las conexiones necesarias para el balanceado de la cuarta célula, empezando por el polo positivo de la batería. Se observa que el circuito está compuesto por tres transistores de tipo mosfet (Q15, Q12 y Q10), por cinco resistencias auxiliares (R35, R34, R33, R29, R28) y por una resistencia de 8.2Ω de 2W (R27), encargada de disipar la carga excedente de la cuarta célula. Esta misma disposición de componentes se repite para las otras cinco células. Así, en cada una de las seis configuraciones se mantienen los mismos valores de componentes, salvo los valores correspondientes a las dos últimas resistencias auxiliares, encargadas del control del tercer transistor. Las equivalentes a R29 y R28, encargadas del control de Q10, en el caso de la cuarta célula.

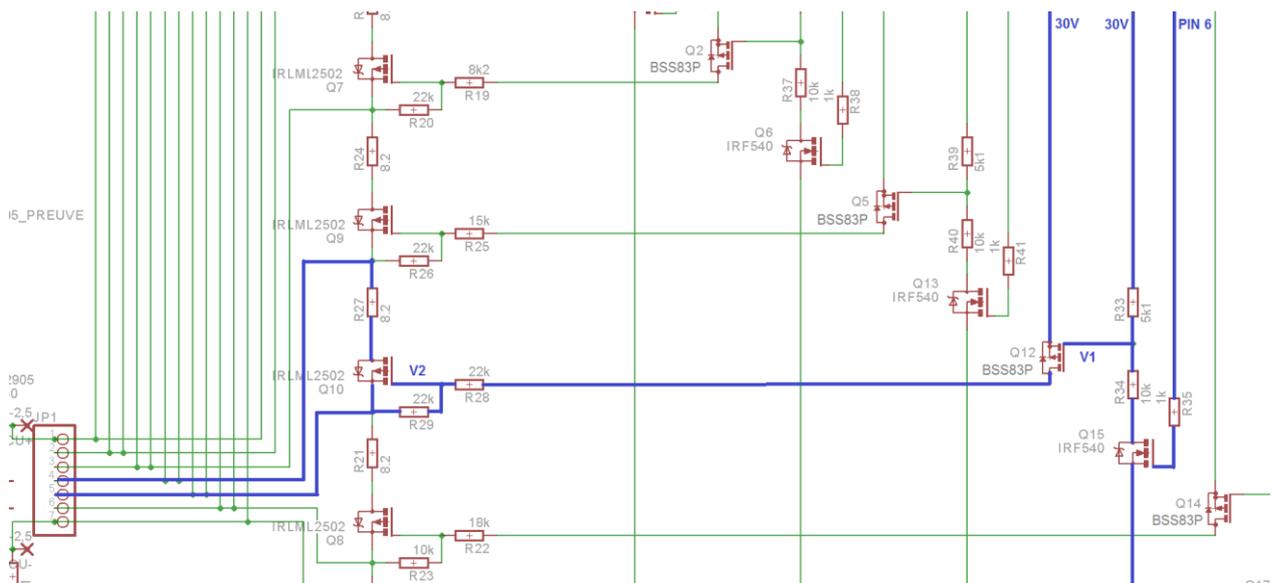


Figura 18. Detalle del circuito de balanceado para la cuarta célula desde el polo positivo de la batería

La primera resistencia auxiliar de cada célula está conectada a los pines de salida del controlador 13, 12, 11, 6, 5 y 4 respectivamente, empezando por el polo positivo. En el momento en que el microcontrolador mida una diferencia de tensión significativa entre las células, es decir, una diferencia mayor a 0.1V, pondrá a 5V el pin de salida correspondiente a la célula de mayor y, por tanto, de mayor estado de carga¹⁴. De aquí en adelante, se va a suponer que dicha célula es la cuarta, para explicar el proceso seguido a la hora de la elección de componentes presentes en la figura 18. Este proceso es análogo para el resto de células de la batería.

Al poner el pin de salida 6 en HIGH, el transistor Q15 entra en zona de saturación. Se trata de un mosfet PMOS IRF540, cuya tensión V_{GS} debe estar comprendida entre 2V y 26V para que sature, por lo que la tensión del pin de salida del microcontrolador es suficiente. La resistencia R35 de 1k Ω conectada entre el microcontrolador y la compuerta del mosfet sirve únicamente para limitar la elevada corriente instantánea que se instala en un primer momento (la corriente es cero en régimen permanente). Como puede observarse en el esquema, cuando el IRF540 satura la tensión V1 queda fijada por los valores de R33 y R34, que forman un divisor de tensión de 30V.

El transistor Q12 es un mosfet BSS83P de tipo NMOS. Así, su tensión V_{GS} , negativa, debe estar comprendida entre -2V y -20V para que se encuentre en saturación. Ello se traduce en que la tensión V1 debe estar comprendida entre 10V y 28V. Los valores de R33 (5.1k Ω) y R34 (10k Ω) para conseguir una V1 de 19.86V. Una vez que el BSS83P satura, la tensión V2 queda fijada por los valores de R28 y R29, que forman un divisor de tensión de 30V.

La tensión V_{GS} del mosfet PMOS IRLML2502 debe estar comprendida entre 1.2V y 12V para que este se encuentre en saturación. Ello implica que la tensión V2 tiene que estar comprendida entre 9.6V y 19V para la cuarta célula. Estos valores dependen de la tensión del extremo negativo de la célula en cuestión (entre 7V y 8.4V para la cuarta). Por ello, el par de resistencias encargado de fijar la tensión V2 de la compuerta de los seis mosfets (Q4, Q7, Q9, Q10, Q8, Q11) difiere según la célula a descargar. En este caso, para una tensión V2 fijada a 15V, las resistencias R28 y R29 de 22k son iguales, por ser de 30V el divisor de tensión. La tabla a continuación recoge la tensión V2 resultante y los valores de las resistencias necesarias para conseguir que los mosfets IRLML2502 saturen en cada uno de los seis casos.

¹⁴ Hay que recordar que la relación entre la capacidad de un acumulador LiPo y la tensión del mismo siempre es directa, ya que la curva de carga característica del acumulador LiPo es siempre creciente.

<i>Célula (empezando por el extremo +)</i>	<i>Tensión del extremo - (en V)</i>	<i>Tensión V2 necesaria (en V)</i>	<i>Resistencias (en kΩ)</i>	<i>Tensión V2 fijada (en V)</i>
1ª	[17.5, 21]	[22.2, 29.5]	R11 = 4.7 R12 = 22	24.72
2ª	[14, 16.8]	[18, 26]	R19 = 8.2 R20 = 22	21.85
3ª	[10.5, 12.6]	[13.8, 22.5]	R25 = 15 R26 = 22	17.84
4ª	[7, 8.4]	[9.6, 19]	R28 = 22 R29 = 22	15.00
5ª	[3.5, 4.2]	[5.4, 15.5]	R22 = 18 R23 = 10	10.71
6ª	0	[1.2, 12]	R31 = 22 R32 = 8.2	8.15

Figura 19. *Valores de las dos últimas resistencias auxiliares y tensión V2 resultante para cada una de las seis células*

Así, una vez que el mosfet Q10 IRLML2502 satura, la cuarta célula comienza a disipar su exceso de carga a través de la resistencia de 8.2Ω de potencia 2W. De esta forma, la intensidad de descarga de la célula será como máximo de 240mA, por lo que el tiempo de balanceado será relativamente largo en caso de un desequilibrio importante de la batería. En el momento en el que la cuarta célula alcance el nivel de tensión de las demás, el microcontrolador pone a 0V el pin de salida 6. Así termina el proceso de balanceado de la cuarta célula, con la desconexión casi instantánea (100ns) de los mosfets Q15, Q12 y Q10.

6. REALIZACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

6.1. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA PCB

El primer paso hacia la materialización física del circuito de carga previamente presentado consiste en la introducción del esquema eléctrico en un programa de diseño de PCBs, como pueden ser Eagle, Altium o KiCad. En este proyecto se ha utilizado Eagle por la facilidad de obtención de Eagle Light, una licencia gratuita del software. Una vez introducido el esquema eléctrico completo (figura 5), con el correcto encapsulado de los diferentes componentes, el programa da la opción de pasar a diseñar la PCB.

El término PCB hace referencia a un circuito impreso (*Printed Circuit Board* en inglés). Se trata de una placa de una o varias superficies aislantes, sobre las que existen pistas conductoras de cobre que conectan los diferentes componentes electrónicos soldados a la placa. Las superficies no están conectadas entre ellas, salvo en puntos específicos a través de taladros o vías, que conectan pistas superpuestas de diferentes capas. El uso de más de una superficie permite reducir el tamaño de la placa y limitar el número de pistas necesarias, gracias a una mayor densidad de componentes. Sin embargo, en la práctica es poco común encontrar circuitos impresos fabricados a mano de más de dos capas, ya que su proceso de elaboración es complicado.

Para la realización física del circuito de carga de la *Boombbox*, el diseño de la PCB se ha efectuado en dos capas, en una placa de 7cm x 9cm (ver figura 20). Estas dimensiones de PCB son las máximas permitidas por la versión gratuita de Eagle, y resultan algo limitadas para la considerable cantidad de componentes del circuito. Ello ha conducido a la elección del encapsulado SMD¹⁵ siempre que fuera posible, ya que este tipo de componentes tienen un tamaño menor y permiten utilizar libremente la superficie opuesta de la placa, al no tener que taladrar el circuito impreso para su soldadura.

Tras haber colocado los componentes en la placa de una manera óptima, de forma tal que el enrutado utilice el menor número posible de vías, la siguiente cuestión importante que se plantea es la elección del tamaño de cada pista. Para el cálculo del ancho mínimo de pista, además de la corriente máxima a soportar, es preciso conocer el espesor de cobre de la pista (altura total de la pista con respecto a la superficie aislante de la placa), así como el incremento máximo de temperatura admisible. En este caso, el

¹⁵ Las siglas SMD hacen referencia a un tipo de montaje superficial (*Surface Mount Device* en inglés), muy comúnmente utilizado actualmente. La alternativa más clásica consiste en la tecnología de agujeros pasantes (*Through Hole* en inglés).

espesor del cobre es de 1 Oz (35 μ m), y el incremento máximo de temperatura aceptable es de 45°C. A partir de los dos gráficos estandarizados publicados en el IPC2152 "Standard for Determining Current Carry Capacity in Printed Board Design", en 2009, es posible deducir fácilmente el ancho de pista necesario para cada conexión. En el apartado de anexos se puede consultar una versión simplificada de dichos gráficos. Debido a la gran densidad de componentes de la PCB, lo ideal sería reducir el ancho de cada pista al mínimo imprescindible, para así tener más superficie disponible y limitar el número de taladros. En general, un ancho de 10mils¹⁶ es suficiente para la intensidad de trabajo del circuito, salvo para las pistas que forman el circuito buck-boost. En este caso, el cálculo de una intensidad a soportar de 3A revela que el ancho de pista mínimo ha de ser de 30mils.

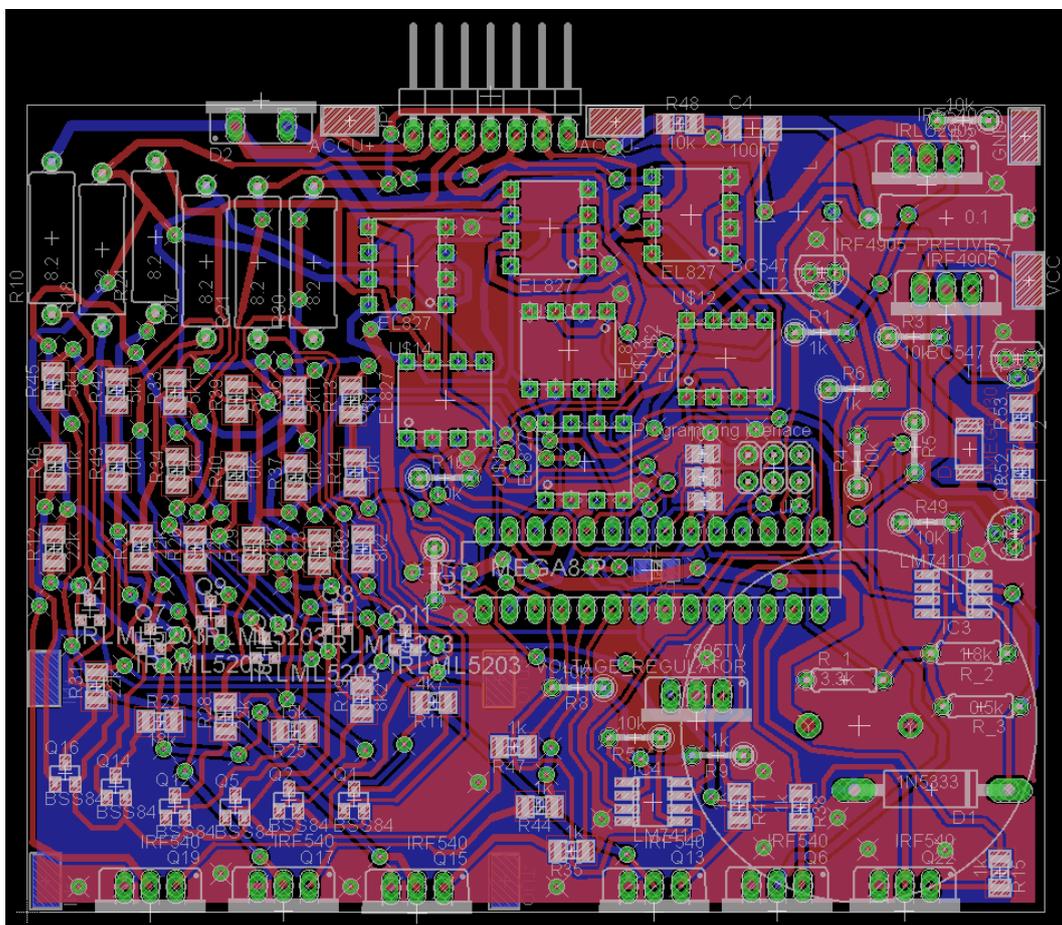


Figura 20. *Diseño final de la PCB en Eagle Light (la capa superior se muestra en rojo y la inferior en azul)*

¹⁶ 1mil es la milésima parte de una pulgada, es decir, equivale a 0.0254mm.

Un último paso antes de la impresión de la placa es la creación de un *common ground plane* (plano de tierra común), para asegurar una masa común estable. Se trata de una práctica común en la fabricación de circuitos impresos, consistiendo en rellenar de cobre la mayor cantidad de superficie de placa posible, evitando claro está las pistas ya creadas. En la figura 20 pueden apreciarse las superficies de masa presentes en ambas capas, todas conectadas entre sí mediante taladros (representados como círculos verdes en el esquema).

La figura 21 muestra los dos archivos necesarios para la fabricación de la PCB, correspondientes a las capas superior e inferior de la misma, generados a partir del diseño previo en Eagle Light. El proceso de fabricación de la placa utiliza las dos siluetas de la figura 21 (impresas en dos láminas de papel vegetal y colocadas de forma coincidente), como plantilla para el correcto atacado de la placa virgen, situada entre ambas láminas. La figura 22 muestra la placa ya impresa.

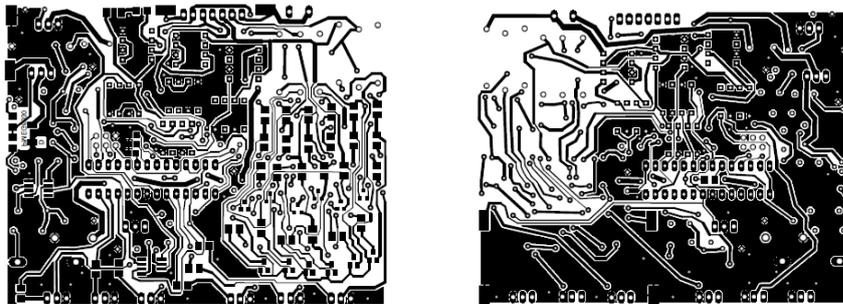


Figura 21. Plantillas de impresión de la PCB del circuito de carga, correspondientes a la cara superior (izquierda, impresa en espejo) e inferior (derecha)

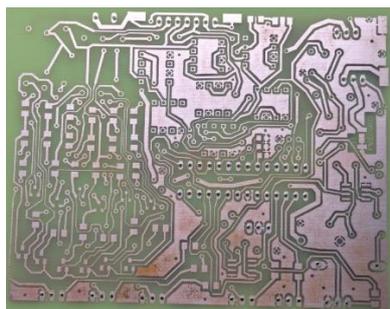


Figura 22. PCB final, antes del taladro de las vías y la soldadura de los componentes

Una vez impreso el circuito, los últimos pasos para su finalización son el taladro de las vías (diámetro de 0.6mm o 0.4mm ocasionalmente), la soldadura superficial de los componentes SMD y la soldadura clásica del resto de elementos.

6.2. COSTES DE PRODUCCIÓN

La motivación técnica detrás de la elección de los diferentes componentes que constituyen el sistema de alimentación se ha expuesto a lo largo del presente documento. Sin embargo, la elección de las marcas y proveedores concretos de los componentes ha estado notablemente marcada por el coste máximo de producción de 400€, imponiéndose continuamente la búsqueda del componente más barato. La tabla presentada a continuación reproduce una lista exhaustiva de todos los componentes utilizados para la realización del sistema de alimentación de la caja acústica.

<i>Proveedor</i>	<i>Item</i>	<i>Descripción</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Precio</i>
Reichelt	IRF 4905	Mosfet P-FET (Tr1)	1	1,10	1,10
	IRLML 2502	Mosfet N-FET (Tr2)	6	0,18	1,08
	PMEG 6030	Diodo (D1)	1	0,27	0,27
	BYW 80/200	Diodo (D2)	1	0,47	0,47
	BC 547B	Transistor npn (T1)	1	0,04	0,04
	BC 547C	Transistor npn (T2)	1	0,04	0,04
	BC 557A	Transistor pnp (Q3)	1	0,04	0,04
	BSN 22.000/40	Condensador 22mF	1	5,80	5,80
	FT 50-77	Núcleo de Fe para L	1	0,77	0,77
	2W DRAHT 0,1	Resistencia 0,1 Ω	1	0,24	0,24
	ATMEGA 168A-PU	Microcontrolador	1	2,25	2,25
	GS 28P-S	Pines microcontrolador	1	0,47	0,47
	IRLZ 34N	Mosfet N-FET	6	0,44	2,64
	BSS 83P SMD	Mosfet P-FET	6	0,11	0,66
	IRLU 2905	Mosfet N-FET	1	0,86	0,86
	2W DRAHT 8,2	Resistencia 8,2 Ω	6	0,24	1,44

	TS 7805 CZ	Regulador de tensión	1	0,32	0,32
Hobbyking	T5000.6S.20	Batería LiPo 6S1P	1	38,41	38,41
Farnell	1852701	Optoacoplador EL827	7	0,435	3,045
	1288204	Condensador SMD 10 μ F	3	0,182	0,546
	1106042	Operacional SMD 741	2	0,379	0,758
RS	463-379	Zener 1N5333BG	1	0,30	0,30
eBay	[eBay1]	Cargador de ordenador	1	7,50	7,50
	[eBay2]	Cable del cargador	1	2,00	2,00
	[eBay3]	Circuito step up	1	1,55	1,55
Ecole Centrale Paris	-	Resistencias: 34 SMD, 12 0207/5, 3 0207/7; pines; condensador SMD 100nF	-	-	2,00 (aprox.)
TOTAL					74,60

Figura 23. Componentes utilizados por el sistema de alimentación de la Boombox

Como bien refleja la tabla superior, el coste total de todos los componentes necesarios para la realización del sistema de carga es de 74.60€, lo que equivale a un 21% del coste total de producción de 352.27€ del primer prototipo. Si bien es cierto que ambos costes no incluyen la mano de obra ni la impresión de los circuitos impresos¹⁷, una futura producción en masa del producto conduciría muy posiblemente a una disminución del coste global de producción, ya que el precio unitario y los gastos de transporte de los componentes se verían altamente reducidos.

La figura 24 ilustra la distribución del coste total de los componentes utilizados para la realización íntegra del sistema de alimentación. En ella se puede comprobar que el coste de los componentes necesarios para la realización del circuito de carga es de 27€.

¹⁷ En el marco de este proyecto, el laboratorio de electrónica LISA de la universidad Ecole Centrale Paris ha corrido con los gastos de impresión de las diversas PCBs de la *Boombox*, ya que todas se han fabricado manualmente en el atelier dedicado a tal fin, incluida la PCB del circuito de carga. Sin embargo, una buena estimación del menor coste de impresión de una PCB de 10x10cm podría situarse en los 3€. [30]

Una primera comparación orientativa de este valor con el precio de mercado de un cargador balanceador típico (45€), pone de manifiesto el interés de la concepción del circuito de carga. Finalmente, la figura 24 evidencia el gran peso de la batería en la estructura del coste del sistema de alimentación, ya que actualmente supone más de la mitad del mismo.

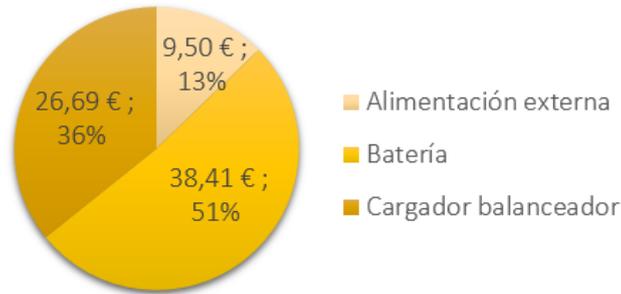


Figura 24. *Reparto del coste total de componentes del sistema de alimentación*

Es por ello que de cara a una producción en masa de la *Boombox*, la start-up *Night Owl Acoustics* estaría muy interesada en conseguir firmar un acuerdo provechoso con el proveedor de baterías. Otra opción complementaria a considerar sería la práctica relativamente común entre los fabricantes de cajas acústicas de no incluir en el precio final del producto el coste íntegro de la batería. De esta forma, el cliente paga algo menos, comprometiéndose la empresa de audio a recoger la batería y cambiarla por una nueva tras haber finalizado su vida útil (aproximadamente tras unos cinco años de utilización). Posteriormente, la empresa podría revender la batería a otras aplicaciones industriales capaces de aprovechar parte de la carga residual de la batería usada.

7. CONCLUSIÓN

Este documento ha presentado la concepción y la realización física individual del sistema de alimentación y de carga de la nueva caja acústica *Boombox*. Dicha caja ha sido desarrollada dentro del marco de un proyecto anual de innovación en la universidad francesa de ingeniería *Ecole Centrale Paris*, por un grupo de cinco estudiantes creadores de la start-up *Night Owl Acoustics*.

Concretamente, en términos de alimentación se ha optado por una batería de polímero de litio de tensión nominal de 22.2V y capacidad nominal de 5000mAh. La elección del polímero de litio se justifica por una masa inferior de los acumuladores de este tipo, además de una mayor vida útil y seguridad de utilización en comparación a los acumuladores de iones de litio. La configuración y capacidad de la batería elegida vienen definidas por las características de los amplificadores escogidos para la *Boombox*, permitiendo la batería comprada una autonomía energética de entre 7h y 9h aproximadamente.

El circuito de carga y balanceado, por su parte, ha sido íntegramente concebido y realizado tal y como se ha presentado respectivamente en los capítulos 5 y 6. La carga de la batería se realiza para una tensión de alimentación variable entre 12V y 30V, lo que explica el doble funcionamiento del circuito de carga *buck-boost*, reductor o elevador de tensión en función de la tensión de entrada. Con objeto de efectuar la carga de la batería en dos tiempos (primero a intensidad constante y después a tensión constante), el microcontrolador varía la tensión e intensidad del circuito actuando sobre los dos transistores de control. El ciclo de trabajo de la señal PWM de control se calcula a partir de las medidas de intensidad y tensión de la batería. La medida de intensidad se efectúa simplemente gracias a una resistencia en serie con la batería. Sin embargo, la medida de tensión necesita la medida de las tensiones de las células individuales, para poder detectar un posible desequilibrio de la batería y actuar en consecuencia. Las tensiones de las seis células se miden secuencialmente utilizando optoacopladores, y en caso de que la diferencia entre alguna supere los 0.1V se activa el circuito de balanceado. En este caso, se trata de un balanceado pasivo, ya que la energía excedente de la célula(s) de mayor estado de carga se disipa mediante resistencias. La realización física del circuito se ha llevado a cabo gracias al diseño en Eagle Light del circuito impreso y la posterior impresión y soldadura de los componentes elegidos en el laboratorio de electrónica de *Ecole Centrale Paris*.

La voluntad de comercializar la caja acústica a través de la recién creada empresa *Night Owl Acoustics* implica una continuación del proyecto, con vistas a perfeccionar el producto en todos sus aspectos, incluido el de alimentación y carga. Así, las perspectivas de mejora del trabajo presentado en este documento parten del cálculo del tiempo de

utilización restante de la caja acústica (respectivamente de espera para finalizar la carga) y su notificación correspondiente al usuario, ya que actualmente no se concibe una aplicación electrónica comercializable sin dichas características.

De este modo, un segundo prototipo de la caja acústica debería permitir al consumidor conocer el estado de descarga de la batería (resp. de carga), así como el tiempo estimado de utilización (resp. de carga) restante. Para la estimación del tiempo de utilización se considerará que las condiciones instantáneas impuestas a la caja en términos de volumen se mantienen hasta la total descarga de la batería y consecuente apagado automático de la caja acústica. En cuanto al estado de la batería, ya sea en carga o descarga, basta con transformar a porcentaje las medidas de tensión que ya efectúa el sistema de alimentación aquí presentado.

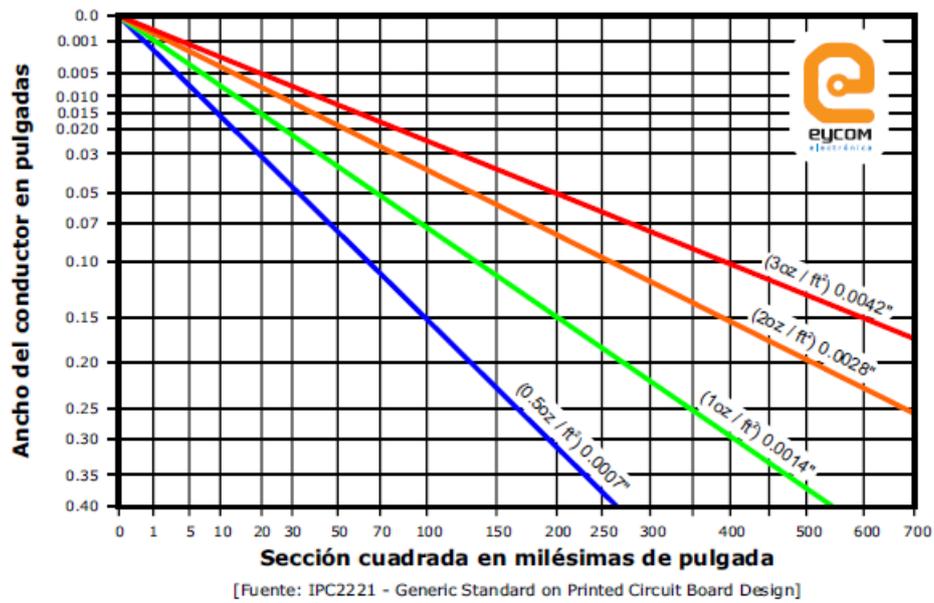
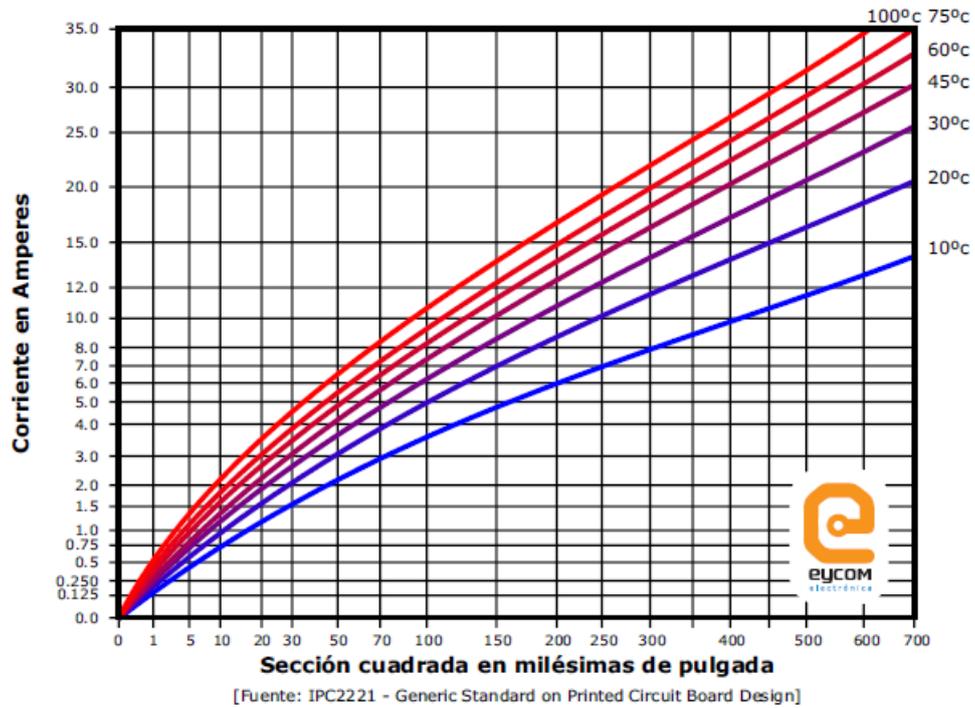
Para transmitir la información al usuario la opción más clásica e intuitiva consiste en incluir una pantalla LCD, que muestre en permanencia no sólo el estado de la batería y el tiempo de utilización restante, sino también otros aspectos de la caja, como pueden ser el título de la canción reproducida, el volumen seleccionado, la hora y fecha, etc. Una opción complementaria que está también siendo considerada para el segundo prototipo de *Boombox* es la iluminación del túnel¹⁸ de la caja acústica mediante LEDs de diferentes colores (verde, amarillo y rojo), en función del estado de carga y de descarga de la batería.

Una última mejora técnica importante a considerar para la construcción del segundo prototipo de *Boombox* es la inclusión de la posibilidad de funcionamiento sin batería, alimentándose la caja acústica directamente a través de la red. Esta funcionalidad, que por ejemplo incluyen actualmente todos los ordenadores portátiles, es especialmente necesaria si no se consigue instaurar la técnica descrita en la sección 6.2 de recogida y sustitución de las baterías gastadas por unas nuevas por parte de la startup *Night Owl Acoustics*. Así, el cliente tendría la certeza de comprar un producto de una vida útil no marcada por el número de ciclos de carga y de descarga de la batería que le alimenta.

¹⁸ El túnel de una caja acústica como la *Boombox*, que utiliza la técnica de *bass reflex* (recinto acústico reflector de bajos), es un tubo hueco que conecta el interior de la caja con el exterior, a través de la llamada ventana. Es el responsable del mejor rendimiento de la caja acústica en términos de bajas frecuencias o graves.

ANEXOS

Gráficos basados en el estándar IPC2221 permitiendo calcular el ancho de pista adecuado para circuitos impresos:



[PIÑE]

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. *Fotos de la caja acústica Boombox terminada, con el logo de la marca Night Owl Acoustics en negro*

Figura 2. *Fidelio P9BLK wireless portable speaker (izquierda) y Soundlink III (derecha)*

Figura 3. *Sony Ultra Premium high-res speaker SRSX9 (izquierda) y Ibox (derecha)*

Figura 4. *Curva de descarga de un acumulador LiPo de la marca Thunder Power RC, de 5000mAh de capacidad y 40C de tasa de descarga constante [10]*

Figura 5. *Esquema completo del circuito de carga*

Figura 6. *Detalle de la alimentación del circuito de carga*

Figura 7. *Conexión de Vcc y AVcc mediante un filtro paso bajo*

Figura 8. *Obtención de una referencia de tensión AREF regulada [RUIZ01]*

Figura 9. *Detalle del circuito buck-boost del sistema de carga de la caja acústica*

Figura 10. *Esquema de un circuito buck-boost genérico [28]*

Figura 11. *Circuito buck genérico HIGH (izquierda) y LOW (derecha) [28]*

Figura 12. *Circuito boost genérico HIGH (izquierda) y LOW (derecha) [28]*

Figura 13. *Medida de las tensiones de cada punto intermedio con respecto a tierra*

Figura 14. *Detalle de la medida de tensiones de las células de la batería*

Figura 15. *Conexiones internas del optoacoplador EL827*

Figura 16. *Circuito interno de los pines de entrada analógicos del microcontrolador ATMEGA168PA*

Figura 17. *Circuito resultante para la medida de la tensión del condensador C4*

Figura 18. *Detalle del circuito de balanceado para la cuarta célula desde el polo positivo de la batería*

Figura 19. *Valores de las dos últimas resistencias auxiliares y tensión V2 resultante para cada una de las seis células*

Figura 20. *Diseño final de la PCB en Eagle Light (la capa superior se muestra en rojo y la inferior en azul)*

Figura 21. *Plantillas de impresión de la PCB del circuito de carga, correspondientes a la cara superior (izquierda, en espejo) e inferior (derecha)*

Figura 22. *PCB final, antes del taladro de las vías y la soldadura de los componentes*

Figura 23. *Componentes comprados para el sistema de alimentación de la Boombox*

Figura 24. *Reparto del coste total de componentes del sistema de alimentación*

BIBLIOGRAFÍA

- [BORU08] Boruchier, F., "Haut-parleurs et enceintes acoustiques", cap. 3-4, 2008
- [1] http://www.visaton.de/de/chassis_zubehoer/index.html
- [2] <http://www.tb-speaker.com/>
- [HECK75] Heckl, M., Müller, H.A., "Taschenbuch der technischen Akustik", 1975
- [SMAL06] Small, R. H., "Vented-Box Loudspeaker Systems, Part I: Small-Signal Analysis", 2006
- [MCCL03] McClellan, J. H., "Signal Processing First", cap. 2, 2003
- [CAJA1] <http://www.p4c.philips.com/cgi-bin/dcbint/cpindex.pl?slg=es&scy=us&ctn=P9BLK/37>
- [CAJA2] http://www.bose.com/controller?url=/shop_online/digital_music_systems/bluetooth_speakers/soundlink_wireless_speaker/index.jsp
- [CAJA3] <http://store.sony.com/ultra-premium-hi-res-bluetooth-speaker-zid27-SRSX9/cat-27-catid-All-Players-Docks>
- [CAJA4] <http://www.thodio.nl/english/products/ibox>
- [ETSY] <https://www.etsy.com/mx/listing/230551007/thodio-ibox-xc-bamboo-naturel-edition>
- [3] <http://www.golem.de/news/ezelleron-brennstoffzellenkraftwerk-fuer-die-hosentasche-1404-105733.html>
- [4] <http://www.ezelleron.eu/de/eZell2.html>
- [5] http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/accumulateur.php4
- [6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique
- [7] http://www.lefigaro.fr/assets/pdf/batterie_CNAM.pdf
- [8] <http://www.son-video.com/Guides/Choisir-Enceintes-Watts-Decibels-Rendement.html>
- [DEVI12] Devillers, N., "Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique", Université de Franche-Comté, 2012
- [BRUN09] Y. Brunet, Y., "Technologie du stockage d'énergie", Traité Electronique - Génie Électrique - Microsystèmes, Lavoisier, 2009
- [9] http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium
- [10] <http://fpvlab.com/forums/archive/index.php/t-15780.html?s=99d7a218d60f6c09c0c06256aeabd243>
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_balancing
- [12] <http://bateriasdelitio.net/?p=54>
- [13] <http://www.mpoweruk.com/balancing.htm>

[14] http://www.ebay.com/itm/A-4A-PCM-Protection-Circuit-Module-for-14-4V-14-8V-4S-Li-ion-Li-Po-Battery-SM389-/221166587306?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item337e8e4daa

[15] http://www.alibaba.com/product-detail/4s-15a-Lipo-PCM-for-Li_60117796321.html

[16] <http://www.batteryspace.com/pcbfor148vli-ionbatterypack4cellswith8a-1alimitwithfuelgaugesocket.aspx>

[17] <http://www.batteryspace.com/Protection-Circuit-Module-PCM-with-Equilibrium-Function-and-Fuel-Gauge-for.aspx>

[18] <http://www.batteryspace.com/PCB/BMS/CMB/UPS.aspx>

[19] http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_management_system

[20] <http://www.powerstream.com/li.htm>

[21] http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries

[22] <https://learn.adafruit.com/li-ion-and-lipoly-batteries/protection-circuitry>

[23] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__15044__Turnigy_Accucel_8_150W_7A_Balancer_Charger_AU_Warehouse_.html

[24] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__9176__Turnigy_5000mAh_6S_20C_Lipo_Pack.html

[25] <http://www.gensace.de/voltage-cell-count/lipo-3-7v-1s.html>

[26] <http://www.yokenergy.com/product/3>

[27] <http://www.lipolbattery.com/high%20rate%20discharge%20lithium%20polymer%20battery.html>

[RUIZ01] Ruiz, G.A., "Electrónica básica para ingenieros", pág. 189-193, 2001

[28] <http://www.learnabout-electronics.org/PSU/psu33.php>

[29] http://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n_por_ancho_de_pulsos

[ROGE99_1] Rogers, E., "Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supplies", 1999

[ROGE99_2] Rogers, E., "Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supplies", 1999

[eBay1] http://www.ebay.com/itm/19-5V-4-7A-Battery-Charger-Cord-Ac-Adapter-For-Sony-VAIO-VGP-Ac19V10-Laptop-Y5RG-/161406405262?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item2594924a8e

[eBay2] http://www.ebay.com/itm/EU-Plug-Laptop-Battery-AC-Adapter-Chargers-Power-Supply-Cable-Cord-Lead-BD-/291322902700?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item43d432b8ac

[eBay3] <http://www.ebay.de/itm/351263793182>

[30] <http://imall.iteadstudio.com/open-pcb/pcb-prototyping.html>

[PIÑE] Piñeiro, C., "Cálculo de capacidad de corriente en pistas de circuitos impresos", Eyco, 2011