



eetac

Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: Circuito para la medición de la carga y la salud de baterías.

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad
Sistemas de Telecomunicación.

AUTOR: David Ferrer Alayeto

DIRECTOR: Àngel Cuadras Tomàs

FECHA: 12 de Setiembre de 2011

Título: Circuito para la medición de la carga y la salud de baterías.

Autor: David Ferrer Alayeto

Director: Àngel Cuadras Tomàs

Fecha: 12 de Setiembre de 2011

Resumen

Cada vez más se utilizan baterías para alimentar dispositivos debido a que la tecnología avanza en la creación de aparatos cada vez más pequeños, portátiles y con muy bajo consumo. En un mundo donde prima la portabilidad en las comunicaciones, las baterías han adquirido una gran importancia, ya que la necesidad de desplazarse sin dejar de comunicarse obliga a la mayoría de dispositivos electrónicos a funcionar mediante este tipo de fuentes de alimentación. Viendo que estas nuevas tecnologías avanzan a una gran velocidad y que, prácticamente, todo el mundo tiene acceso a ellas, es lógico pensar que el usuario debe tener conocimiento, en todo momento, de la autonomía de su dispositivo, es decir, tiene que saber, más o menos, durante cuanto tiempo va a poder hacer uso del aparato. La manera de conocer este dato es sabiendo el estado de carga de la batería y así estimar la duración de funcionamiento del dispositivo.

En el funcionamiento de la batería se definen dos parámetros básicos: Estado de Carga (SoC) y Estado de Salud (SoH), State of Charge y State of Health respectivamente y hacen referencia a la carga disponible en la batería (en %) y a su envejecimiento. La inmensa mayoría de aparatos electrónicos del mercado que funcionan con baterías disponen de un medidor de carga (indicador del SoC), aunque no tienen en cuenta todos los factores de los que depende el SoC como son la impedancia interna, la tensión de circuito abierto, la tensión entre terminales, el número de ciclos de carga-descarga, etc. Únicamente se centran en las magnitudes de Tensión y Corriente. Estas medidas no son muy fiables, ya que no se tiene en cuenta el envejecimiento de la batería, factor que influye muy directamente en la duración de su carga. Por esta razón, hay que hallar un método mucho más fiable y riguroso a la hora de determinar el Estado de Carga (SoC).

En este proyecto, se propone diseñar un circuito de medida del SoC que determine su valor mediante las variaciones de la impedancia interna de la batería de litio. El valor de la impedancia interna depende directamente del SoC y del SoH. En rasgos generales, lo que se pretende es diseñar un circuito que genere una señal senoidal para que sea inyectada en la batería y estudiar las variaciones de fase que sufre dependiendo del estado de carga, es decir, la fase variará según la impedancia interna de la batería. Una vez obtenidos estos resultados, hay que procesarlos y obtendremos un sistema que nos devolverá el resultado de su Estado de Carga (SoC). Todo este proceso se hará mediante un circuito electrónico para generar las señales y comparar sus fases y un microprocesador para procesar los datos obtenidos. El microprocesador usado es un sistema llamado PSOC (Programmable System on Chip) que incorpora un display con la finalidad de mostrar el SoC obtenido a partir de las variaciones de la impedancia interna.

Title: Batteries charge and health measurement circuit

Author: David Ferrer Alayeto

Director: Àngel Cuadras Tomàs

Date: September, 12th 2011

Overview

There has been an obvious increase in the use of batteries to power devices, as technological evolution has led to the development of portable and low-energy devices in increasingly smaller size. The need to communicate 'on the move' has led to the use of batteries in most of the electronic devices. Since these new technologies are developing at a rapid pace and virtually everyone has access to them. Users need to be continually aware of the device's battery life, that is users should know how long the device can operate. The best way to find out this data is to be aware of the battery charging status in order to estimate the battery life.

The battery operation is defined by two basic parameters: State of Charge (SoC), which refers to the amount of energy left in the battery (in percentage), and State of Health (SoH), which indicates the aging of the battery. Most of the battery-operated electronic devices contain a charge gauge (SoC indicator), even though it does not take into account all the SoC factors, such as internal impedance, open circuit voltage, the voltage between the battery terminals and number of charge/discharge cycles, among others. The gauge is mainly focused on voltage and current magnitudes. However, those measures are not very reliable, as they do not take the battery aging into account, which is directly related to battery life. Therefore, a more reliable and rigorous method is suitable to determine the Status of Charge (SoC).

In this project a SoC measuring circuit has been designed. It determines the value of SoC taking into account the variations of the internal impedance of the lithium battery. The internal impedance value is directly linked to the SoC and SoH. In general terms, the aim is to design a circuit that produces a sine signal that is injected into the battery, and then study the phase variation induced by the dependence on the state of charge (SoC). The phase will vary according to the battery internal impedance. Phase data will be processed in order to be converted to State of Charge (SoC). We design an electronic circuit that produces signals and allows the phase comparison, along with a microprocessor to process the collected data. The chosen microprocessor is a PSOC system (Programmable System on Chip) which contains an LCD display which finally shows the SoC of the battery inferred from impedance measurements.

*A mi familia, amigos que me apoyan, Miky y
sobre todo a **Bea**, sin ella no hubiera sido posible.*

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1. CONCEPTOS TEÓRICOS | 2 |
| 1.1 Baterías | 2 |
| 1.1.1 Funcionamiento | 2 |
| 1.1.2 Parámetros de la batería | 4 |
| 1.2 Métodos para determinar el Estado de Carga | 8 |
| 1.2.1 Medición de la Densidad Específica..... | 8 |
| 1.2.2 Medición basada en la tensión | 9 |
| 1.2.3 Coulomb Counting..... | 10 |
| 1.2.4 Combinación de técnicas | 11 |
| 1.2.5 Medición de la impedancia | 13 |
| 1.3 Battery Management System (BMS) | 14 |
| 1.3.1 Protección contra temperatura | 14 |
| 1.3.2 Protección contra cortocircuito | 15 |
| 1.3.3 Ejemplo de BMS | 15 |
| CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE MEDIDA | 17 |
| 2.1 Generador de señal y comparador de fase | 17 |
| 2.1.1 El PLL en el circuito para medir el Estado de Carga (SoC) | 18 |
| 2.2 Equipamiento de laboratorio | 19 |
| 2.2.1 Osciloscopio | 19 |
| 2.2.2 Otros equipos utilizados | 20 |
| 2.3 Sistema de procesamiento de resultados | 21 |
| 2.4 Material de estudio: La batería | 24 |
| CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL CIRCUITO Y SIMULACIONES | 25 |
| 3.1 Diagrama de bloques | 25 |
| 3.2 Circuito para la medición del estado de carga (SoC) | 27 |
| 3.2.1 Circuito para generar la señal | 29 |
| 3.2.2 Filtro para convertir la señal cuadrada en senoidal..... | 30 |
| 3.2.3 Circuito amplificador de corriente | 32 |
| 3.2.4 Conversor A/D y detector de fase. | 35 |
| 3.2.5 Controlador | 38 |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS | 42 |
| 4.1 Medidas experimentales y discusiones | 42 |
| 4.1.1 Introducción | 42 |
| 4.1.2 Corriente de carga y descarga para determinar el SoC..... | 43 |
| 4.1.3 Tensiones de carga y descarga vs. Tensión en circuito abierto | 44 |
| 4.1.4 Consumo del circuito de medida del SoC | 46 |
| 4.1.5 Diferencia de fase de la onda senoidal | 48 |
| 4.1.6 Propuestas de mejora del circuito | 52 |
| 4.2 Procesamiento de resultados mediante PSOC | 53 |
| CONCLUSIONES | 54 |
| BIBLIOGRAFÍA | 55 |
| ANEXOS | 57 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 1. 1 | Procesos de carga y descarga de una batería de Li-ion..... | 3 |
| Figura 1. 2 | Circuito equivalente de una batería en DC..... | 4 |
| Figura 1. 3 | Capacidad de carga de la batería..... | 6 |
| Figura 1. 4 | Ciclos carga/descarga vs. DOD..... | 7 |
| Figura 1. 5 | Densímetro para conocer el estado de las baterías de plomo-ácido..... | 9 |
| Figura 1. 6 | Tensión en circuito abierto vs. SoC para baterías de plomo..... | 9 |
| Figura 1. 7 | Tensión vs. Capacidad de descarga para baterías de litio..... | 10 |
| Figura 1. 8 | Derivación del SoC a causa de los sensores de corriente en HEV..... | 11 |
| Figura 1. 9 | SoC actual vs. SoC estimado en sistemas de HEV..... | 11 |
| Figura 1. 10 | Combinación de ambas técnicas..... | 12 |
| Figura 1. 11 | Calibración de la curva estimada..... | 12 |
| Figura 1. 12 | Circuito equivalente de una celda..... | 13 |
| Figura 1. 13 | Ejemplo de BMS..... | 15 |
| Figura 2. 1 | Bloques de oscilador y comparador de fase..... | 17 |
| Figura 2. 2 | PsoCEVAL1. Kit para utilizar el microcontrolador PSoC..... | 22 |
| Figura 2. 3 | Pantalla de diseño de PsoC Designer..... | 23 |
| Figura 2. 4 | Circuito de carga recomendado por Maxell..... | 24 |
| Figura 3. 1 | Diagrama de bloques del sistema de medida del SoC..... | 25 |
| Figura 3. 2 | Esquema teórico del circuito de medida del SoC..... | 28 |
| Figura 3. 3 | Divisor de tensión..... | 29 |
| Figura 3. 4 | Simulación en PSPICE de la salida del VCO..... | 30 |
| Figura 3. 5 | Simulación de PSPICE de la señal de salida del filtro con $f_c= 10\text{Hz}$ | 32 |
| Figura 3. 6 | Simulación en Pspice de la señal de entrada del amplificador de corriente (v_3). Se comparará con la salida..... | 34 |
| Figura 3. 7 | Simulación en PSPICE de la señal senoidal que llega a la batería..... | 35 |
| Figura 3. 8 | Simulación en PSPICE de la salida del comparador2..... | 36 |
| Figura 3. 9 | Señal de salida del comparador de fase..... | 37 |
| Figura 3. 10 | Timers y conexiones en PSOC..... | 39 |
| Figura 3. 11 | Parámetros globales de PSOC..... | 40 |
| Figura 3. 12 | Parámetros de los Timers utilizados..... | 40 |
| Figura 3. 13 | Circuito de medición del SoC y procesamiento de resultados..... | 41 |
| Figura 4. 1 | Descarga de la batería con una $R=330\ \Omega$ | 43 |
| Figura 4. 2 | Evolución de la tensión en circuito abierto..... | 44 |
| Figura 4. 3 | Tensiones en el proceso de carga..... | 45 |
| Figura 4. 4 | Comparativa de la tensión en la batería al desconectarla del circuito y tensión en circuito abierto en función del SoC..... | 45 |
| Figura 4. 5 | Ejemplo del problema que supone el consumo del circuito..... | 46 |
| Figura 4. 6 | Corriente que aporta la batería a la medida y corriente de carga..... | 47 |
| Figura 4. 7 | Señales medidas con el osciloscopio correspondiente a un SoC del 100 % (arriba), y 10 % (abajo)..... | 49 |
| Figura 4. 8 | Desfase que sufre la senoidal (eje derecho) para una señal de 10 Hz..... | 50 |
| Figura 4. 9 | Variación de la fase de la señal senoidal de 10 Hz respecto el SoC..... | 50 |
| Figura 4. 10 | Variaciones de fase para las 3 frecuencias en sus procesos de carga y de descarga..... | 51 |
| Figura 4. 11 | Comparativa del desfase, para una señal de 10 Hz, del proceso de carga y de descarga..... | 52 |
| Figura 4. 12 | Display LCD mostrando el SoC y la frecuencia de 'señal'..... | 53 |
| Figura A. 1 | Esquema teórico del circuito adyacente para la optimización de las medidas de diferencia de fase..... | 57 |
| Figura A. 2 | Circuito real montado en la baquelita..... | 58 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabla 2. 1 | Comparación entre PLL analógico y Digital | 18 |
| Tabla 2. 2 | Especificaciones Osciloscopio Digital Tektronix TDS3032..... | 20 |
| Tabla 2. 3 | Especificaciones más importantes del polímetro FLUKE 189 | 21 |
| Tabla 2. 4 | Características de la batería ML2016 | 24 |
| Tabla 3. 1 | Valores y conexiones más relevantes del PLL..... | 29 |
| Tabla 3. 2 | Tensiones e intensidades en DC de la Bomba de corriente..... | 34 |
| Tabla 3. 3 | Tabla de la verdad de la puerta lógica OR-exclusiva (XOR). | 37 |
| Tabla 4. 1 | Relación entre capacidades erróneas y reales en el proceso de carga..... | 48 |

INTRODUCCIÓN

Aunque la mayoría de dispositivos electrónicos disponen de indicadores del Estado de Carga, sus resultados no tienen en cuenta las variaciones en la impedancia interna de la batería. La impedancia interna es una característica intrínseca de cada batería y está directamente relacionada con su Estado de Carga (State of Charge –SoC-), que indica la energía disponible en la batería, y su Estado de Salud (State of Health –SoH-) que nos indica el desgaste de ésta y su capacidad de almacenar energía.

La impedancia es muy relevante a la hora de determinar el envejecimiento de la batería y, por tanto, su Estado de Salud (SoH). Entonces, es posible que las indicaciones del SoC en la mayoría de aparatos electrónicos no se ajusten a la realidad. Eso se debe a que la indicación del SoC no es del todo fiable si la batería está deteriorada.

Una manera de conocer la impedancia interna de un componente electrónico es mediante un analizador de impedancias. Este aparato inyecta una señal senoidal en el componente a medir y realiza un barrido de frecuencias devolviendo el valor de la impedancia en todo el rango, que van desde los mHz hasta los KHz. Este proyecto se propone abaratar y optimizar los sistemas actuales de medición del Estado de Carga de las baterías de iones de litio (Li-Ion) emulando el funcionamiento de un analizador de impedancias pero reduciendo su tamaño y su coste. Para ello, se diseñará un circuito que genere varias señales senoidales que se inyectarán en la batería y se estudiarán sus variaciones. La finalidad del circuito no es conocer qué impedancia tiene la batería en cuestión, sino relacionar dicha impedancia con el estado de carga (SoC). Para llegar a ese objetivo, se estudiarán los cambios de fase que provoca la batería en la señal inyectada, siendo la variación en su impedancia interna la causante de dicho desfase. Posteriormente, habrá que relacionar esos cambios de fase con estados de carga (SoC) conocidos. Toda la información recopilada será procesada por un microprocesador, el cual nos devolverá el SoC de la batería en el momento que deseemos conocerlo.

El trabajo está estructurado en cuatro capítulos. El primero trata sobre las técnicas utilizadas hoy en día para determinar el estado de carga por los dispositivos más comunes del mercado como, por ejemplo, teléfonos móviles, coches eléctricos, Sistemas de alimentación Interrumpida (SAIs), etc. En el segundo capítulo se exponen los diferentes métodos de medida e instrumentos utilizados. En el tercero se describe el diseño del circuito para medir el estado de carga y la programación del microcontrolador mediante el software de desarrollo PSOC. Por último, en el cuarto capítulo se pretende mostrar y discutir los resultados y compararlos con los resultados obtenidos en otros estudios semejantes.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS TEÓRICOS

Debido a que se va a diseñar un circuito capaz de indicar el estado de carga de las baterías, en este capítulo se van a estudiar algunos de los sistemas de monitorización de baterías que hay en el mercado. Evidentemente, se hará especial hincapié en monitores de baterías de Li-ion, aunque también es interesante hacer una pequeña introducción en la monitorización de los Sistemas de Alimentación Interrumpida (SAIs) y, por qué no, en cómo se monitorizan las baterías de coches eléctricos y baterías secundarias de vehículos como autocaravanas o barcos. Estos últimos sistemas no tienen mucha relación con las Telecomunicaciones, aunque gran parte de los dispositivos de comunicación dependan de acumuladores, pero pueden ayudar a comprender la importancia de conocer el estado de nuestras baterías, ya sea en un ámbito más personal y comercial o en uno mucho más industrial y profesional.

1.1 Baterías

Teniendo en cuenta que la protagonista principal de este trabajo es la batería en sí, es necesario adentrarse un poco en las características principales de este elemento para poder entender lo que se tratará a lo largo de los siguientes capítulos.

La energía eléctrica juega un importante papel en nuestra sociedad, sin embargo, ésta no se puede almacenar directamente. Los condensadores, por ejemplo, sí son capaces de almacenarla de manera directa, aunque en cantidades minúsculas, cantidades que no alcanzan a cumplir los niveles de demanda de los dispositivos. Asimismo, se entiende que para poder almacenar este tipo de energía, es necesaria su transformación. En las baterías, la energía de sus compuestos químicos actúa como medio de almacenamiento, así que en su descarga ocurre un proceso químico que genera energía que puede extraerse de la batería en forma de corriente eléctrica con un valor de voltaje determinado. La batería es un componente eléctrico que actúa como una fuente de tensión continua.

Hay algunos tipos de baterías en las que este proceso es reversible y pueden ser cargadas de nuevo, por esa razón destacamos dos grandes grupos, las baterías de **carácter primario y las secundarias**. Las baterías primarias están destinadas a convertir la energía química en eléctrica sólo una vez (pilas), mientras que en las secundarias estos procesos químicos son reversibles y son capaces de repetir los procesos de carga y descarga. [4]

1.1.1 Funcionamiento

Una batería está formada por varias celdas. Cada celda consta de dos electrodos, que son unas placas de membrana metálica diseñadas para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo, un electrolito.

El electrolito es el medio por el que circulan las cargas y que unen ambos electrodos en una misma celda y se conoce como cualquier sustancia que contenga iones libres, por lo que se convierte en conductor eléctrico. El electrolito

puede ser ácido o alcalino por lo que a su química se refiere y líquido o sólido, por su fase.

La manera en que una celda genera energía eléctrica se basa en un principio llamado reducción-oxidación. En este proceso uno de sus componentes (electrodo reductor ó ánodo) se oxida, dando lugar a la pérdida de electrones, por lo que tendrá carga positiva, mientras que el otro, a través del medio conductor (electrolito) ganará los electrones perdidos en un proceso de reducción y, por lo tanto, se cargará negativamente (electrodo oxidante ó cátodo). Estos procesos son reversibles, como ya se ha comentado en el apartado 1.1, por lo que un electrodo puede oxidarse o reducirse dependiendo de cómo cerremos el circuito, es decir, si le aplicamos una corriente eléctrica o lo conectamos a una carga iniciando, así, su proceso de descarga [1,2,3]. Todo este proceso hace que se produzca una diferencia de potencial entre los terminales de la batería y que libere, en el caso de cerrar el circuito conectando una carga, una corriente eléctrica.

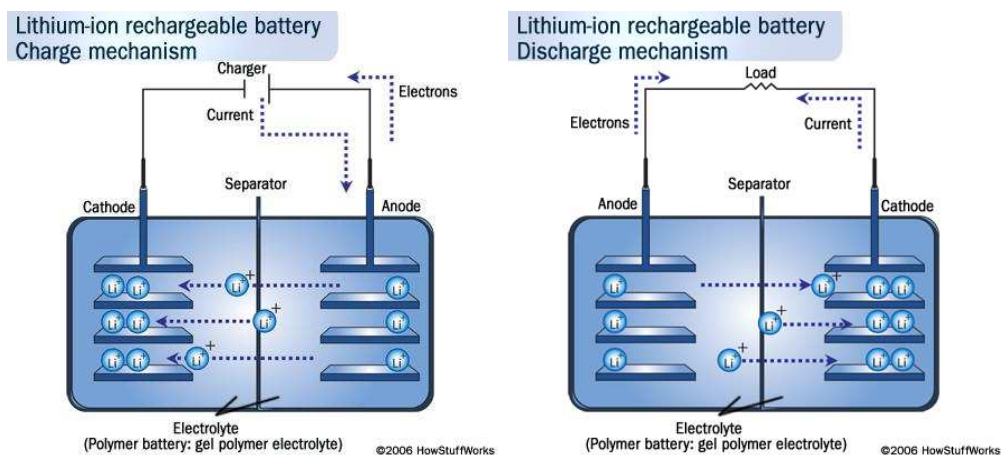


Figura 1. 1 Procesos de carga y descarga de una batería de Li-ion.[5]

Como se puede observar en la figura 1.1, el electrodo con exceso de electrones atrae a los iones positivos. En este caso, el cátodo estaría en proceso de reducción aceptando los electrones liberados por el ánodo que, lógicamente, estaría en proceso de oxidación. Todo ellos provoca que circule una corriente eléctrica a través de la carga siendo el cátodo el electrodo positivo en la descarga. En el proceso de carga ocurre todo lo contrario, es el ánodo el terminal positivo.

La impedancia interna es un factor capacitivo de la batería que se definirá en el apartado siguiente. Consta de parte resistiva y parte capacitiva y varía en función de las condiciones del electrolito y de los electrodos. La densidad del electrolito aumenta al producirse la carga, lo que disminuye progresivamente el valor de su parte real. Durante el proceso de descarga ocurre todo lo contrario, disminuye la densidad por lo que aumenta su resistencia interna.

El funcionamiento eléctrico de una batería puede representarse mediante un circuito equivalente formado por una fuente ideal de tensión (V_{bi}) conectada en serie con una resistencia (R_b) que equivaldría a su resistencia interna (parte real

de la impedancia). Este circuito sólo tiene en cuenta la parte resistiva de la impedancia (circuito en DC) pero, en realidad, intervienen unas capacidades parásitas debidas a las uniones entre electrolito y electrodos.

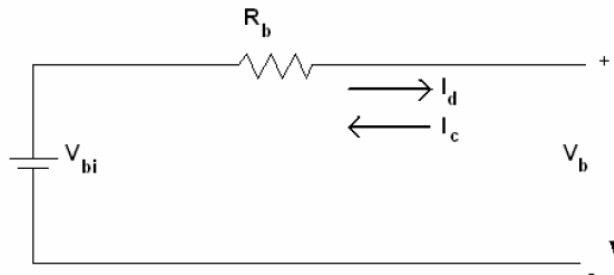


Figura 1. 2 Circuito equivalente de una batería en DC.

Durante el proceso de carga se produce una liberación de iones al electrolito. Esta liberación de iones desarrolla un aumento de tensión en las celdas de la batería y una disminución progresiva de la corriente de carga como consecuencia de la mayor acumulación de iones disponibles. Como se ha comentado en el párrafo anterior, R_b también disminuye. La tensión en los bornes de la batería (V_b), por lo tanto, aumenta en relación a la siguiente fórmula 1.1:

$$V_b = V_{bi} + R_b I_c \quad (1.1)$$

En el proceso de descarga hay una corriente que se demanda. Esta corriente que la batería tiene entregar provoca la descomposición de los iones en el electrolito, lo que se traduce en una disminución sustancial en la V_{bi} y un aumento significativo de R_b . La tensión en los bornes de la batería se reduce en función de la siguiente fórmula 1.2:

$$V_b = V_{bi} - R_b I_d \quad (1.2)$$

1.1.2 Parámetros de la batería

Antes de estudiar los métodos de monitorización, se describirán los parámetros más comunes que caracterizan a las baterías y que dan información sobre su estado.

Para poder determinar qué batería es la ideal para una aplicación determinada tenemos que conocer una serie de datos que hacen que las baterías se distingan las unas de las otras.

Principalmente, las características eléctricas se definen por 4 parámetros:

- **Tensión nominal:** Es un valor especificado por el fabricante y se refiere a la diferencia de potencial entre los terminales positivo y negativo. Este valor no está verificado experimentalmente, ya que varía con el SoC y con el SoH. La tensión entre terminales se obtiene cuando hay una carga conectada, si bien la

batería está deteriorada o descargada, el valor de tensión nominal no corresponderá que el fabricante indica, ya que sufrirá una caída notable por no ser capaz de mantener ese nivel de voltaje. Un importante parámetro es la tensión de carga, que se define como la tensión necesaria para vencer la resistencia que opone una batería al ser cargada.

- Tensión en Circuito Abierto (V_{oc}): Se trata del valor de tensión entre los bornes de la batería cuando ésta no tiene carga alguna conectada. Éste es un valor de suma importancia a la hora de determinar el Estado de Carga (SoC).
- Capacidad nominal: Es la cantidad de electricidad que puede obtenerse mediante la descarga total de una batería cargada al máximo. Se mide en Coulombs (C) o Amperios-hora (Ah). Amperios-hora, por lo tanto, también es una unidad de carga (Q). $1Ah = 3600 C$.
La capacidad de la batería siempre va referenciada a un régimen de descarga marcado por el fabricante. El régimen de descarga es el número de horas en que una batería es capaz de suministrar corriente hasta que se descarga completamente. Los fabricantes suelen indicar la capacidad para regímenes de descarga de 100, 20 y 10 horas. Así, si una batería posee una capacidad de 1200Ah para 100 horas, quiere decir que esta batería es capaz de suministrar 12 A durante esas 100 horas.
- Impedancia Interna: Es la resistencia que oponen todos los componentes internos de la batería como electrodos, electrolito y terminales y varía en función del estado de carga y el estado de salud. Aumenta con la descarga de la batería y con el envejecimiento de ésta. Contra más impedancia interna menor rendimiento de la batería. Como ya se ha comentado, consta de parte real e imaginaria y es principalmente capacitiva. Así que para conocer su módulo y fase es necesario estudiar su influencia en una señal senoidal. En las corrientes de carga y descarga sólo interviene la parte resistiva (resistencia interna), por lo que no aporta suficiente información sobre su estado de salud ya que no es posible conocer la influencia de las capacidades parásitas con señales DC.

Hay otros parámetros muy relevantes a la hora de definir las características de una u otra batería:

- Celda: El menor elemento que forma una batería, pueden ser asociada en serie o en paralelo con otras, con el objetivo de conseguir los valores de corriente o de tensión deseados [13].
- Profundidad de Descarga: Llamado *Depth of Discharge (DoD)*, se mide en tanto por ciento y hace referencia a la cantidad de energía extraída de una batería en función de su capacidad nominal en cada ciclo de descarga. Si una batería de 25mAh se descarga 2,5mAh diremos que su DoD es del 10%. Según los fabricantes de baterías [4,8], contra menor sea el DoD más ciclos de carga-descarga podrá soportar esa batería. La profundidad de descarga máxima (DoD_{max}) es la cantidad de energía que podemos extraer sin dañar la batería y tiene una estrecha relación con la capacidad útil, que no es más que la capacidad que puede suministrar realmente. Asimismo, la capacidad útil es el producto de la capacidad nominal y el DoD máximo.

- Estado de Carga: *State of Charge (SoC)* en inglés, es el parámetro más importante de los que se van a tratar, principalmente porque este trabajo se propone determinarlo con total exactitud. Se expresa en tanto por ciento y es el valor de la energía que tiene la batería en un momento dado, es decir, el porcentaje de carga en relación con su capacidad total. Es exactamente el parámetro contrario al DoD. Para un DoD del 20% su SoC es del 80%. Los fabricantes recomiendan un SoC mínimo que conviene no alcanzar si se pretende alargar la vida de la batería. Este SoC_{\min} suele rondar el 20% ó el 30%. Así, el SoC_{\min} es:[10]

$$SoC_{\min} = 100 - DoD_{\max} \quad (1.3)$$

- Estado de Salud: *State of Health (SoH)*. Este parámetro cuantifica la degradación y el envejecimiento sufrido por la batería. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el SoH afecta muy directamente a la capacidad de la batería de almacenar energía. Para un mismo estado de carga (SoC), una batería deteriorada puede contener menos energía que una recién fabricada, en la que su SoH es del 100%. Para comprender mejor el deterioro de las baterías, se puede observar la figura 1.3 que ilustra de qué manera una batería puede pasar a ser inservible.



Figura 1. 3 Capacidad de carga de la batería. Tres secciones imaginarias

Como se puede observar, las tres partes corresponden a una zona vacía para poder llenarla, la zona de energía disponible y, por último, la zona inservible, zona de la batería que jamás volverá a ser cargada.[9] El estado de salud (SoH) mide precisamente qué porcentaje del total le corresponde a esta zona inservible.

- Vida Útil: Se considera vida útil al tiempo que tarda una batería en reducir su capacidad a un 80% del total. El DOD está directamente relacionado con este parámetro ya que, dependiendo de la profundidad de descarga de cada ciclo de carga/descarga, la batería puede realizar un número determinado de ciclos hasta finalizar su vida útil: contra mayor es el DOD, menor es su vida útil (Figura 1.4). Por lo tanto, también podemos definir “vida útil” como el número de ciclos carga-descarga que soportaría. Además, las baterías tienen vida flotante, que indica la vida máxima de la batería independientemente de los ciclos que realicen.

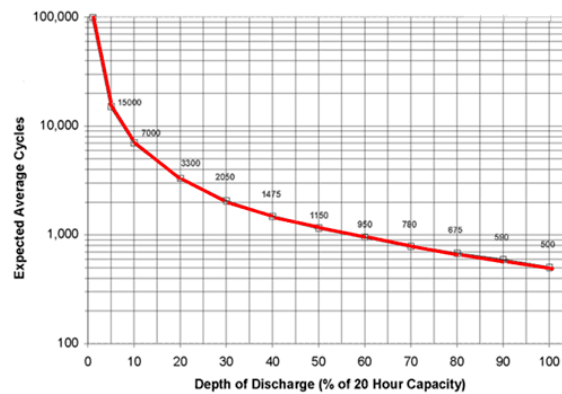


Figura 1. 4 Ciclos carga/descarga vs. DOD. Ejemplo para batería plomo-ácido extrapolable a cualquier tipo de celda, incluida Li-ion.[11]

- Relacionado con el concepto de vida útil está la **tensión de corte**, que se refiere a la mínima tensión permitida para que los procesos de carga-descarga no sean irreversibles.
- **Autodescarga:** Es el proceso por el que la batería pierde parte de su carga sin que haya elemento alguno conectado a ella. Se debe a procesos internos que, aún estando en circuito abierto, hacen que se genere esta corriente de descarga. Esto debe considerarse como un consumo adicional y se cuantifica como el denominado coeficiente de autodescarga que define la cantidad de energía perdida en un periodo de tiempo. Las buenas baterías presentan un valor del 3% mensual. [10]
- **Eficacia (%):** Es la fracción de energía eléctrica que devuelve la batería, en proporción a la energía que ha sido necesaria para cargarla. Cuanto más alta, mayor será su rendimiento, idealmente el 100%. También es importante que una batería mantenga su eficacia en función del tiempo de almacenamiento.[13]
- **Efecto de la Temperatura:** La temperatura es uno de los factores externos que más afectan al correcto funcionamiento de las baterías. La temperatura óptima es de 25°C. Si esta temperatura desciende, su capacidad también se ve reducida. Generalmente, por cada grado de aumento o descenso, la capacidad de la batería varía en un 0,43 %. Las altas temperaturas, por otro lado, son extremadamente dañinas para la batería y acortan sustancialmente su vida útil. Más lo menos, por cada 10°C de aumento por encima de los 35 °C, el tiempo de vida se reduce a la mitad en cada profundidad de descarga.

Uno de las grandes preguntas de los usuarios es si deben cargar la batería antes de que se agote por completo. El **efecto memoria** es el responsable de estas dudas y se produce cuando cargamos la batería antes de que se haya descargado un 50%. Esto provoca una disminución de su capacidad aumentando así la zona inservible. No es conveniente los ciclos con DODs profundos pero tampoco los son los DOD cortos. El efecto memoria no afecta a todos los tipos de baterías. Unas de las que no se ven afectadas son, precisamente, las de litio. No sólo no sufren el efecto memoria, sino que además es contraproducente dejar que se descarguen demasiado.

1.2 Métodos para determinar el Estado de Carga

No hay manera directa de medir el estado de carga (SOC) de una batería. Hay formas indirectas de estimación pero cada uno sufre de limitaciones. Este documento describe cómo la combinación de dos técnicas puede dar lugar a una estimación muy razonable del SOC. Estas dos técnicas son, principalmente, la estimación por voltaje y la técnica llamada "Coulomb Counting".

Una cosa a tener en cuenta de los sistemas de monitorización del SOC es que siempre hace referencia a la capacidad actual de la celda, sin tener en cuenta el deterioro ni envejecimiento. Eso quiere decir que para una celda que ha perdido el 20% de su capacidad nominal, es decir, que como máximo puede alcanzar una capacidad del 80%, el 100% de su estado de carga será ese 80% de su capacidad nominal. Por lo tanto, para que esa medida sea lo más exacta posible debería hacer referencia a la capacidad nominal y no a la actual.

Se tratarán los métodos utilizados en el mundo industrial y doméstico para conocer el estado de las baterías y saber, lo más aproximadamente posible, cuándo se debe proceder a su sustitución. Sobretodo, es importante conocer durante cuanto tiempo estarán operativos los dispositivos alimentados por éstas.

Las baterías que más importancia tienen en este trabajo son las de Litio, pero se hará referencia a diferentes tipos para realizar una visión mucho más completa de los métodos utilizados. Cabe destacar que en la industria de la automoción se están usando grandes baterías de Litio para los coches eléctricos; de ahí la importancia de unos buenos sistemas de gestión electrónica de baterías, no sólo para prolongar la vida de ésta sino para ser lo más exacto posible a la hora de determinar la autonomía.

1.2.1 Medición de la Densidad Específica

Uno de los métodos más rigurosos para conocer el estado de las batería de plomo es midiendo la densidad del electrolito directamente. Esta operación proporciona, con absoluta certeza, el estado de cada una de las celdas. No hay que olvidar que, para poder medir la densidad de un líquido hay que acceder directamente a él. Por lo tanto, las baterías que están selladas herméticamente no se pueden comprobar usando este método. La densidad del electrolito de una batería plenamente cargada está de entre 1230 a 1290 gr/cm³, aunque esta medida depende mucho de la temperatura y puede variar.

Para conocer la densidad del ácido se hace uso de un instrumento llamado **densímetro** y funciona cogiendo una muestra de ácido. Consta de una boya que flota en ese ácido indicando su densidad. En la figura 1.5 se describen sus partes:

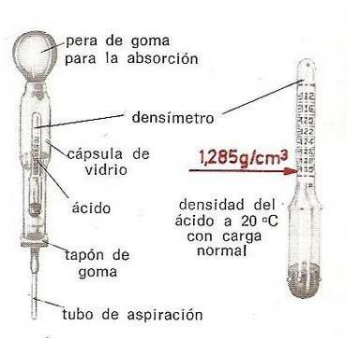


Figura 1. 5 Densímetro para conocer el estado de las baterías de plomo-ácido.

Asimismo, en una batería aumenta la densidad del ácido contra mayor sea la energía acumulada, es decir, en una batería cargada, la proporción de ácido en solución aumenta mientras que en una descargada disminuye de manera directamente proporcional. Hoy en día hay sensores electrónicos que proporcionan una medición digital de la densidad y pueden dar una lectura continua de la condición de la batería.

1.2.2 Medición basada en la tensión

En muchos sistemas se utiliza la medida del voltaje para estimar la capacidad de la batería en un momento determinado. Los resultados pueden variar considerablemente dependiendo de la temperatura, la velocidad de descarga, el nivel de tensión actual y la edad de la batería. Aún así, las baterías de plomo sufren un cambio muy significativo en sus valores de tensión durante su descarga. Algo que, por ejemplo, no ocurre en las baterías de Litio porque apenas hay diferencia entre el voltaje de la batería al 100% y su voltaje cuando está descargada. El siguiente gráfico muestra la relación entre los valores de **Tensión en Circuito Abierto (Voc)** y la capacidad residual en una batería de plomo-ácido a temperatura constante (figura 1.6):

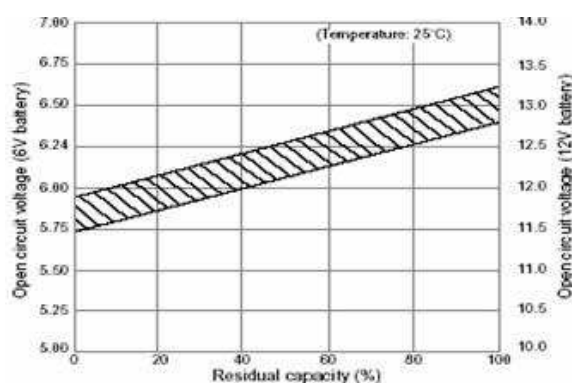


Figura 1. 6 Tensión en circuito abierto vs. SoC para baterías de plomo. [11]

En contraposición, se observa en la figura 1.7 como la variación de tensión durante el proceso de descarga en una celda Li-ion (iones de litio) no es tan significativa. Se mantiene más bien constante en casi todo el proceso de descarga, por lo que esta medida no serviría para determinar el estado de carga de este tipo de baterías. Sí que serviría para estimar cuándo está casi al 100% o casi agotada, ya

que el descenso en el voltaje es muy constante durante la descarga excepto en los extremos. Asimismo, la figura 1.7, a diferencia de la figura anterior, no relaciona el voltaje con su estado de carga sino con su capacidad de descarga.

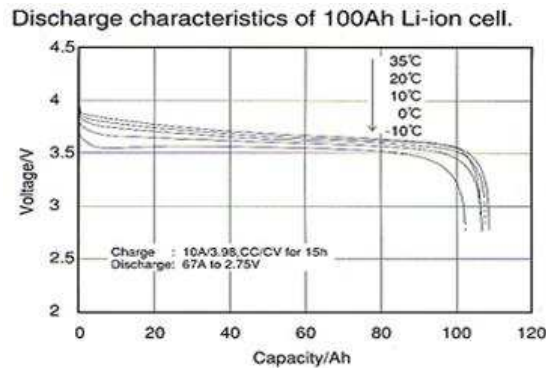


Figura 1. 7 Tensión vs. Capacidad de descarga para baterías de litio. Celda. Se observa la brusca caída cuando se descarga completamente. [11]

1.2.3 Coulomb Counting

Esta técnica es una de las más importantes de las utilizadas actualmente. Será la técnica de referencia a la hora de determinar los estados de carga en la parte experimental del estudio. Consiste en la integración de la corriente que entra o sale de la batería durante un tiempo determinado, como se indica en la fórmula 1.4 [6,11]. El resultado nos da un valor relativo de la carga. La palabra clave es “relativo” ya que, como todas las integrales definidas, “Coulomb Counting” necesita un punto de partida, es decir, conocer el estado de carga inicial.

$$SoC = \frac{\int I(t)dt}{C_{nom}} \quad (1.4)$$

Un ejemplo claro es el siguiente: si una batería de 25Ah se carga a 1 A durante 5 horas, incrementa su carga en 5Ah, es decir, un 20% más ($5/25=0,20$) de lo que había en una primera instancia. Ahora bien, si no se sabe lo que había al principio, no se puede saber lo que habrá al final.

Esta técnica es bastante precisa en baterías de Litio, pero no lo es tanto en baterías de plomo-ácido. Esto se debe a que las de plomo sufren una fuga de corriente importante que los aparatos de medida no recogen, por lo que a la hora de determinar la capacidad no se tendría en cuenta la intensidad perdida. Además, no toda la carga de estas baterías se convierte en trabajo útil ya que una pequeña parte es calor residual. Otro de los problemas (para Li-ion sobretodo) es que cualquier pequeña desviación en la medida de la corriente de la batería puede generar una deriva en el SoC hacia arriba o hacia abajo a la hora de integrar los resultados.

Algunos sistemas, como el de los coches Híbridos (HEV), son capaces de corregir la deriva provocada por el offset de los sensores de corriente. La figura 1.8

muestra una gráfica en la que se mide la corriente en ciclos de carga-descarga indicando la diferencia entre la corriente real y la que los sensores están midiendo. Esa pequeña diferencia de corriente se traduce un una deriva muy considerable a la hora de calcular el estado de carga (SoC). Así pues, esta técnica es muy buena para estimar el SoC siempre y cuando pueda calibrarse esta derivación en algún punto.

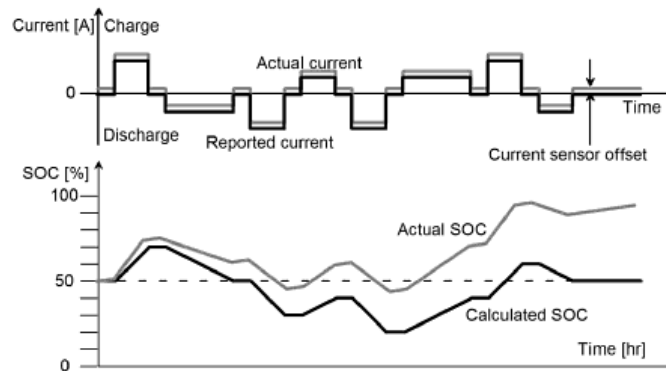


Figura 1. 8 Derivación del SoC a causa de los sensores de corriente en HEV.[12]

1.2.4 Combinación de técnicas

Debido a que la técnica de “Coulomb Counting” no es lo suficiente precisa por sus problemas de deriva causados por los sistemas de medida de corriente, hay que buscar cómo calibrar esta técnica para precisar mucho más sus resultados. Una buena solución es la combinación de las medidas de tensión con la técnica de “Coulomb Counting”.

La medida de tensión supone una buena solución a la hora de calibrar los resultados obtenidos mediante la integración de la corriente que entra y sale de la batería. Mientras que mediante “Coulomb Counting” se obtiene la carga relativa de la batería, con la monitorización de la tensión se calibra el SoC cuando se acerca a uno de sus extremos ya que es en los puntos cercanos al 0 % y el 100 % donde la medida de tensión es más significativa.

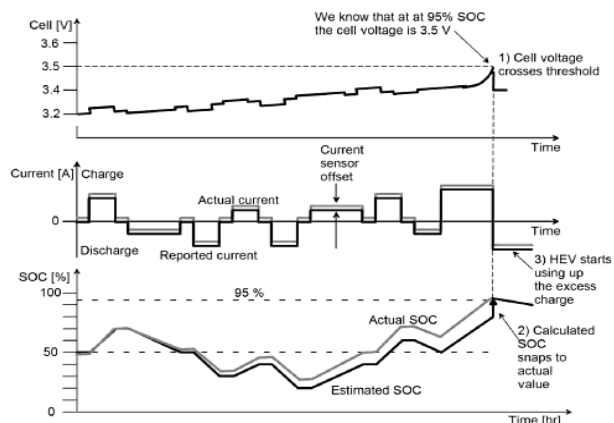


Figura 1. 9 SoC actual vs. SoC estimado en sistemas de HEV.[12]

Como se puede observar en la figura 1.9, los sistemas de monitorización de vehículos híbridos, por ejemplo, se acercan mucho más a la realidad porque combinan varias técnicas para estimar el estado de carga.

La técnica consiste en relacionar un valor de tensión con un estado de carga conocido. A modo de ejemplo: si para un valor de 3.4 V, por ejemplo, su SoC es del 90%, entonces, cuando integramos la intensidad, hay que aproximar ese punto al valor real.

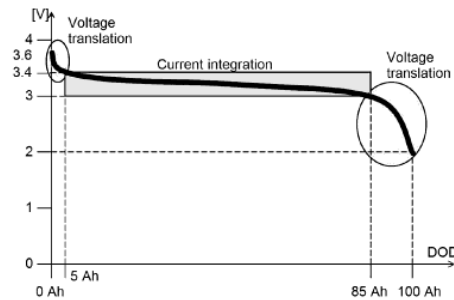


Figura 1. 10 Combinación de ambas técnicas. En vez de SoC, se muestra el DOD

Cuando se cruza el umbral de tensión es cuando se debe calibrar el resultado y pasar de usar la técnica de integración para fijarse en la medida de tensión. Una vez cruzado ese umbral, habrá que modificar la gráfica obtenida por cálculo para que se acerque lo más posible a la realidad, realidad cuyo punto de partida lo marca ese umbral de tensión. La siguiente figura 1.11 muestra cómo se consigue esto. Las dos últimas gráficas muestran el DOD y no el SoC, para lo que se pretende explicar no importa, ya que están directamente relacionados.

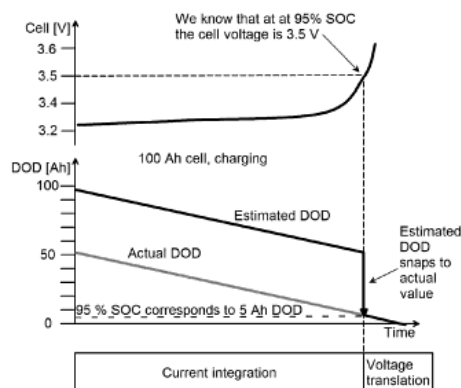


Figura 1. 11 Calibración de la curva estimada

Todo esto es posible gracias a los **BMS o Battery Management Systems**. Son los sistemas encargados de controlar y gestionar las baterías de Litio, debido a que son éstas las que más necesidad tienen de mantenerse dentro de un marco de seguridad y garantizar así la longevidad de su vida útil. Tienen mucha importancia los BMS integrados en vehículos eléctricos.

1.2.5 Medición de la impedancia

El aumento de la impedancia interna de una batería afecta directamente a su estado de salud, por lo que la capacidad de retención de carga se verá también afectada. La impedancia brinda una medida de la resultante entre la resistencia y la reactancia de una celda electroquímica. El aumento de la impedancia a través del tiempo aporta una referencia sobre cambios en las uniones internas de los electrodos con el electrolito y soldaduras de placas a bornes. También, y lo que es más importante, pone de manifiesto los efectos de la reducción del área efectiva de las placas debido a la sulfatación (baterías de plomo).

En la figura 1.2 se mostraba un circuito equivalente de una batería. Su objetivo era hacer una analogía de la batería como circuito eléctrico. No obstante, la impedancia interna no sólo consta de parte real, tal y como muestra la figura 1.2. En la siguiente figura 1.12 se muestra una equivalencia más aproximada:

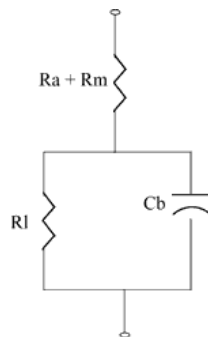


Figura 1. 12 Circuito equivalente de una celda

Los componentes del circuito equivalente son:

Rm: resistencia opuesta por electrodos e interconexiones.

Ra: resistencia de la parte electroquímica (electrolito).

Ri: resistencia generada entre el contacto de los electrodos con el electrolito.

Cb: capacidad de las placas paralelas que forman los electrodos.

Si hay alguna manera de cuantificar cómo le afecta el envejecimiento y la degradación a la batería, es decir, si se pudiese determinar el SoH con total precisión sería a través de medidas de impedancia interna. La razón es que la degradación de sus componentes internos tiene una relación directa con el valor de impedancia interna, por lo que conociendo ese factor sería posible conocer en qué estado se encuentran sus componentes.

El método para medir la impedancia consiste en inyectar una señal alterna de frecuencia y amplitud conocidas y medir la corriente y su fase. Para determinar la impedancia (módulo y fase), se aplica la Ley de Ohm donde la intensidad tiene una diferencia de fase con respecto a la tensión:

$$Z = \frac{V}{Ie^{j\alpha}} \quad (1.5)$$

Teniendo en cuenta que la conductancia es la inversa de la impedancia y sabiendo que a medida que aumenta la impedancia disminuye la capacidad, podemos

establecer una relación indirecta entre la conductancia y la capacidad. Asimismo, se establece una correlación entre la conductancia y el SoH.

Estas pruebas pueden ser incorporadas a diferentes estructuras químicas de celdas mientras se tengan en cuenta los factores de calibración necesarios para adaptarlos a los perfiles de envejecimiento correspondientes a cada una de estas celdas.

1.3 Battery Management System (BMS)

Se conoce como BMS a cualquier dispositivo electrónico que gestiona y controla una celda recargable. Se utiliza comúnmente para controlar baterías compuestas de varias celdas y se hace indispensable en la gestión de baterías de litio. Como ya se ha comentado con anterioridad, un uso muy frecuente de estos dispositivos es el de controlar las baterías de los coches eléctricos. Cualquiera de las técnicas explicadas en el apartado anterior (1.2) podría estar perfectamente integrada en un BMS.

Hay tres objetivos principales y comunes a todos los Sistemas de Gestión de la batería (BMS) [13]:

- Proteger las celdas o pack de batería de daños.
- Prolongar la vida de la batería.
- Mantener la batería en un estado en el que pueda cumplir con los requisitos para la que se ha especificado

Los métodos de protección de baterías variarán dependiendo de cuántas celdas tenga esa batería y de la composición química de ésta.

Los parámetros de protección básicos deben ser los siguientes:

- Exceso de corriente durante la carga o descarga.
- Cortocircuito.
- Sobrepasar valores máximos de tensión durante la carga.
- Sobrepasar valores mínimos de tensión durante la descarga (DOD_{max}).
- Temperatura ambiente alta.
- Temperatura ambiente baja.
- Sobrecalentamiento.
- La acumulación de presión dentro de la célula.
- Sistema de aislamiento en el caso de un accidente.

1.3.1 Protección contra temperatura

La protección por temperatura es una de las partes más importantes de un BMS. Tanto el exceso como la disminución de temperatura pueden provocar en la

batería que disminuyan sus prestaciones prematuramente, por no hablar del aumento de su resistencia interna.

Para el análisis de la temperatura se utilizan termistores, o lo que es lo mismo, sensores resistivos de temperatura. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad en función de la temperatura, es decir, varías su valor óhmico. Normalmente, el termistor comúnmente utilizado es el **PTC**, que aumenta su resistencia con el aumento de la temperatura. También puede usarse el **NTC** que disminuye su valor con el aumento de la temperatura.

Estos sensores suelen utilizarse para desconectar el cargador si la temperatura aumenta o bien, para refrigerar las baterías a través de ventiladores. Además, la mayoría de sistemas van provistos de un fusible térmico que desconectará el sistema en caso de sobrepasar su umbral.

1.3.2 Protección contra cortocircuito

Este tipo de protección es prioritaria a la hora de proteger las baterías. Es particularmente importante en baterías de alta capacidad o de alto voltaje, donde un cortocircuito la dañaría por completo. Con las baterías de última generación aumenta la peligrosidad debido a las altas capacidades de descarga con las que están diseñadas.

Hay varias maneras de proteger un batería contra un cortocircuito. Los más comunes son el fusible, el relé y un diodo Zéner.

1.3.3 Ejemplo de BMS

Para ejemplarizar los sistemas de monitorización de baterías se ha elegido un sistema para controlar las baterías secundarias de barcos. Realmente, serviría para gestionar cualquier batería. Su nombre es Mastervolt Masterlink BTM-III y empresas como Radio Televisión Española [22] lo utiliza para gestionar las baterías secundarias de sus unidades móviles:



Figura 1. 13 Ejemplo de BMS. Mastervolt Masterlink BTM-III para baterías secundarias. [14]

Lo que se muestra en la figura 1.14 sólo es el cuadro de control, el sistema consta de otros componentes.

Este sistema en concreto es capaz de proporcionar información sobre el estado de 3 bancos de baterías simultáneamente. Esta información incluye: la lectura de la tensión, la corriente, los amperios-hora, el tiempo restante y la capacidad restante (en %) de las tres baterías independientes. Además cuenta con leds para mostrar el estado de carga además de mostrarlo también en la pantalla LCD. No sólo muestra las medidas instantáneas, sino que también es capaz de almacenar un histórico de lo sucedido en medidas anteriores.

Solamente la batería 1 es la que está medida de manera más directa y exacta al estar conectada a un derivador (shunt). A través de este shunt se sabrá con absoluta certeza la corriente de carga y descarga y, por lo tanto, conociendo la capacidad de la batería, saber su estado de carga (SoC). No es posible conectar un shunt a los bancos 2 y 3, así que si está habilitada la opción de conocer el SoC, este BMS lo resolverá a través de un complicado algoritmo. En comparación con la medida del banco 1, este resultado es mucho menos preciso dando, solamente, una estimación.

Entre los polos positivos y Masterlink BTM-III se deberá colocar un fusible de 2A. Este sistema viene provisto de un software con el que registrar y controlar todo el proceso de monitorización.

Resumiendo, las características de este sistema son:

- Control de tres baterías independientes (12/24VCC)
- Fácil instalación
- Derivador (shunt) de 500A/50mV (medición precisa de la batería 1)
- Estado de carga
- Cálculo automático del Factor de eficiencia de carga (batería 1)
- Amplios datos históricos
- Contador de excesos, que indica descargas demasiado intensas o lentas.
- Conexión 0183 NMEA
- Lectura posible en diez idiomas diferentes.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE MEDIDA

Este capítulo tratará sobre qué tipo de instrumentación se ha utilizado para llevar a cabo el experimento. No sólo se enumerarán y explicarán los instrumentos de medida, sino que también se explicará el funcionamiento de alguno de los componentes más importantes del proyecto como, por ejemplo, el encargado de generar la señal senoidal que inyectaremos en la batería. Este elemento es un oscilador controlado por tensión (VCO) y pertenece a un sistema llamado PLL (phase-locked loop). Además, el PLL se encargará de comparar las fases de dos señales ya que también incorpora un comparador de fase; señales que serán clave a la hora de determinar el estado de carga (SoC).

2.1 Generador de señal y comparador de fase

Se va a explicar brevemente el funcionamiento básico del generador de señal y del comparador de fase. Ambos están integrados en un circuito PLL pero trabajando de manera independiente.

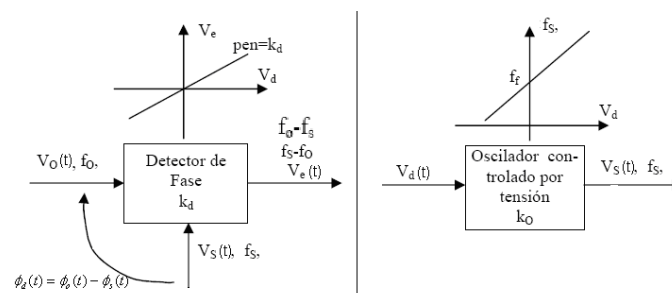


Figura 2. 1 Bloques de oscilador y comparador de fase.

- **Detector de fase:** La tensión de salida del detector es proporcional a la diferencia entre las fases de referencia y la de salida (error de fase $\phi_d(t)$). K_d es la ganancia del detector y corresponde a una constante de proporcionalidad. Un valor típico sería 2V/rad. El detector, cuando excede su rango lineal, se comporta como un mezclador. Éste entrega la mezcla de las frecuencias $f_O - f_S$ ó $f_S - f_O$ dependiendo de cual sea mayor. En resumen, la finalidad del detector es determinar el desfase existente entre 2 señales. Hay PLLs que funcionan con señales digitales y otros con analógicas pues, dependiendo del tipo de señal, determinaremos el tipo de detector de fase.
- **VCO (Oscilador controlado por tensión):** La frecuencia f_S es proporcional a la tensión de control del VCO (V_d). Esta proporcionalidad viene dada por una constante (K_O) llamada sensibilidad del VCO e indica la variación de Hertzios por cada voltio de tensión de control. Un valor típico podría ser 100Hz/V. Sintetizando, podemos decir que la misión del VCO será la de oscilar a la frecuencia deseada.

Para una correcta elección del tipo de VCO hay que tener en cuenta el factor de la temperatura. La frecuencia del VCO está sujeta a la señal de entrada, pero la relación de fase de la señal de salida del oscilador con la señal de entrada va a depender de la frecuencia natural del oscilador. Es aquí donde la temperatura juega un papel muy importante a la hora de escoger el VCO más adecuado para nuestro sistema ya que las variaciones de temperatura pueden producir cambios en la fase de salida del VCO. Si estos cambios son excesivamente grandes pueden hacer que pierda la frecuencia.

Teniendo en cuenta este factor, para tener una buena estabilidad, la frecuencia de nuestro VCO debe variar lo menos posible frente a la temperatura, tiempo y ruido.

2.1.1 El PLL en el circuito para medir el Estado de Carga (SoC)

Tras esta pequeña toma de contacto con el funcionamiento básico de las partes del PLL que se van a usar, se explicará la función de este elemento en el circuito de medida de SoC que se va a diseñar.

El sistema se basa, principalmente, en la inyección de una señal alterna de frecuencia conocida en una batería. Por lo tanto, el PLL es parte fundamental del sistema. A diferencia de los circuitos convencionales que usan PLLs, en este estudio se fija la frecuencia de salida del VCO. La señal obtenida del VCO será la señal de referencia y se tratará posteriormente para inyectarla en la batería y ver las variaciones que sufre a causa de su impedancia. Precisamente, este sistema usa el detector de fase para comparar dos señales: una proveniente del VCO y por tanto señal de entrada de la batería y la otra su señal de salida.

Al ser el elemento principal del circuito, es de vital importancia decidir qué PLL usar, teniendo en cuenta las características que tendrá el circuito y la posterior adquisición de datos. Hay dos modelos en el mercado que se ajustan a las necesidades del proyecto. La diferencia principal entre ambos es que uno de ellos es analógico y el otro es digital; lo que básicamente significa que el digital generará una señal TTL (cuadrada positiva) y el analógico una señal senoidal. Los modelos son **HEF4046B** de Philips (digital) y LM565 (analógico).

La siguiente tabla 2.1 mostrará las diferencias entre ambos y facilitará la toma de decisión sobre qué PLL se ajusta más a lo que se pretende conseguir.

Tabla 2. 1 Comparación entre PLL analógico y Digital

| | HEF4046 | LM565 |
|---------------------------------|----------------|--------------|
| V de alimentación | de 3 a 15V | ±12V |
| Consumo | 20µA a 5V | 8 mA |
| f_{max} de VCO | 1MHz | 500KHz |
| f_{o_min} de VCO | 1Hz | 100Hz |

Observando la tabla anterior parece evidente que el más apropiado es el 4046 digital. No sólo tiene un consumo mucho menor, sino que también optimiza mucho mejor los recursos al no necesitar alimentación negativa. Además, ofrece la

posibilidad de generar señales de frecuencias menores y mayores que su equivalente analógico.

La alimentación y el consumo son muy relevantes ya que, finalmente, se pretende alimentar todo el circuito con la misma batería. El no hacer uso de alimentaciones negativas y que su tensión mínima de alimentación sea de 3V hacen que la balanza se decante hacia el integrado digital; por no hablar del consumo claro.

Ya se han analizado los pros pero, ¿qué ocurre con los contras? El único inconveniente es que, al generar una señal digital, es necesaria su conversión digital-analógica (CDA) para poderla inyectar en la batería y observar los cambios que sufre. Esto es un mal menor ya que, si se decidiera utilizar el PLL analógico habría que digitalizar esa señal para poder procesarla mediante el microcontrolador; por lo que ninguna de las dos señales se libraría de ser convertida.

Para concluir, comentar que el comparador de fase del PLL digital no es más que una puerta lógica, una XOR para ser más exactos. Por lo tanto, tendrá valor 1 (5 V) cuando ambas señales no coincidan.[2]

2.2 Equipamiento de laboratorio

A continuación se explicará el conjunto de equipos que se han utilizado para la elaboración del estudio haciendo una breve introducción sobre su funcionamiento básico y sus características técnicas.

Como lo que se pretende es construir un circuito que sea capaz de inyectar en una batería una señal senoidal y que, a su vez, compare las señales a la entrada y salida, no se han utilizado elementos de laboratorio tales como generador de funciones ni fasímetro. La razón es que el circuito ya hace las veces de generador y de comparador de fase. De todas maneras, explicar brevemente el funcionamiento del fasímetro puede ayudar a cotejar resultados y comprobar si, realmente, el comparador de fase integrado en el PLL cumple perfectamente su función.

2.2.1 Osciloscopio

El osciloscopio es de suma importancia a la hora de determinar el Estado de Carga en este proyecto. Sólo con un osciloscopio se pueden cuantificar los grados de desfase debido al uso del comparador de fase del PLL en vez del fasímetro. El fasímetro da directamente el resultado pero lo que se pretende es, precisamente, conseguir los mismos resultados prescindiendo de él.

El detector de fase del PLL nos entrega la resultante de la comparación entre dos señales. El osciloscopio se encargará de medir, cuantas veces sea necesario, el tiempo de pulso de esa señal hasta conseguir establecer una gráfica que nos relacione esa diferencia de fase con el estado de carga (SoC).

El osciloscopio utilizado es el *Tektronix TDS 3032 Digital Phosphor Oscilloscopes* y sus especificaciones técnicas son las siguientes: [17]

Tabla 2. 2 Especificaciones Osciloscopio Digital Tektronix TDS3032

| | |
|--|---|
| Ancho de banda | 300 MHz |
| Canales de entrada | 2 |
| Trigger externo | Sí |
| Muestreo para cada canal | 2.5 GS/s |
| División vertical a 1 MΩ | 1 mV/div a 10 V/div |
| División vertical a 50 Ω | 1 mV/div a 1 V/div |
| Impedancia de entrada | 1 M Ω en paralelo con 13 pF ó 50 Ω |
| Precisión de ganancia DC | +2% |
| Máx. tensión de entrada, 1 MΩ | 150 V _{RMS} con picos hasta \leq 400 V |
| Máx. tensión de entrada, 50 Ω | 5 V _{RMS} con picos hasta \leq 30 V |
| Límite de ancho de banda | 20 MHz, 150 MHz |
| Rango de la escala de tiempo | 2 ns a 10 s |

Una vez que las sondas estén perfectamente calibradas, el procedimiento para medir el desfase es el siguiente: el canal 1 es el canal de referencia del osciloscopio. En este canal habrá que medir la señal sin desfasar, es decir, antes de ser inyectada en la batería. Por lo tanto, el canal 2 medirá la señal resultante de la comparación entre las señales que entran y salen de la batería, o lo que es lo mismo, se medirá la salida del comparador de fase. En el capítulo 4 se detallará qué señales y en que puntos se medirá ya que, como se ha comentado anteriormente, la señal sufrirá varias transformaciones entre analógico y digital.

2.2.2 Otros equipos utilizados

Además de los equipos antes mencionados, en el laboratorio se utilizan otra clase de aparatos que no requieren una explicación tan detallada.

2.2.2.1 Polímetro

El polímetro, más comúnmente conocido como “téster” o multímetro, es el aparato de medida más utilizado por los profesionales de la electrónica y la electricidad. Entre sus muchas funciones destacamos la posibilidad de medir tensión y amperaje, tanto en continua como en alterna, resistencia y continuidad de una línea. Además, puede determinar el correcto funcionamiento de diodos y transistores.

El polímetro utilizado es el *FLUKE 189*. La marca FLUKE es líder indiscutible en este tipo de aparatos de medidas, no sólo por el gran abanico de posibilidades que ofrecen sus productos, sino porque son estrictamente rigurosos con el tema de seguridad. Todos sus polímetros cumplen con las normas de seguridad por sobretensión.

Este circuito trabaja con baja tensión y poco importa la categoría de seguridad por sobretensión que tenga el téster pero, no solamente se diferencian de sus más directos competidores por ser los más seguros, sino que también por ser los más precisos y estables. La siguiente tabla muestra las características del polímetro.

Tabla 2. 3 Especificaciones más importantes del polímetro FLUKE 189

| | |
|--------------|--|
| Tensión CC | Precisión* $\pm (0,025\% + 5)$ Resolución máxima 1 μV Máximo 1.000 V |
| Tensión CA | Precisión* $\pm (0,4\% + 40)$ Resolución máxima 1 μV Máximo 1.000 V |
| Corriente CC | Precisión* $\pm (0,15\% + 2)$ Resolución máxima 0,01 μA Máximo 10 A |
| Corriente CA | Precisión* $\pm (0,75\% + 5)$ Resolución máxima 0,01 μA Máximo 10 A |
| Resistencia | resición* $\pm (0,05\% + 2)$ Resolución máxima 0,01 Ω Máximo 500 M Ω |

2.2.2.2 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación utilizada es la *PROMAX FAC-662B*. La función principal de la fuente es alimentar el circuito a +5V, puesto que hay varios componentes activos que constituyen el sistema. Esta fuente dispone de 3 tomas de tensión independientes, dos de ellas son variables y pueden dar hasta 30V con una corriente máxima de 1A. La tercera toma corresponde a una fuente de tensión fija de 5V con una corriente máxima de 2A.

Las dos fuentes variables también disponen de un potenciómetro para ajustar la Intensidad Límite que pueden entregar. Esto será de gran ayuda para cargar las baterías ya que el tipo de batería utilizado no necesita cargador; pueden ser cargadas con la misma fuente. Simplemente tenemos que ajustar el voltaje de carga (3.3 V en este caso) y limitar la corriente máxima que nos indica el fabricante de la batería. Tras conectar directamente los bornes de ésta a la fuente y esperar el tiempo necesario hasta que la batería deje de demandar corriente, la batería estará cargada.

2.3 Sistema de procesamiento de resultados

Este sistema cuenta con un circuito que genera una señal, la convierte, la inyecta en una batería y compara su fase con la señal que sale de esta batería. También ha de haber un sistema adyacente que sea capaz de leer esas señales y determinar qué significan.

El encargado de leer los datos, procesarlos y determinar el estado de carga es un sistema basado en la programación de microprocesadores llamado *PSoC1 EVALUATION KIT* de la empresa *CYPRESS Semiconductor*.

A diferencia de los clásicos microcontroladores como PIC donde el usuario debe ceñirse a sus recursos estáticos y a la poca versatilidad y posibilidades que ofrece, PSoC o Programmable System on Chip, es la tecnología de microcontrolador que incorpora todo un sistema configurable dentro de un único chip. Comprende una matriz configurable de funciones analógicas, solapada con otra de funciones digitales, dando al sistema la capacidad de asignar cualquier función a cualquier terminal del circuito integrado, lo que confiere una gran versatilidad al dispositivo.

Cuenta con innumerables dispositivos electrónicos, los cuales pueden modificarse para crear dentro del mismo chip todo tipo de funciones analógicas o digitales como, por ejemplo, filtros, comparadores, amplificadores, convertidores AD/DA, moduladores de ancho de pulso (PWM), contadores y timers. Estos dos últimos pueden ser de 8, 16 ó 32 bits. Consta de dos tipos de bloques: analógico y digital. Dependiendo de la familia de microcontrolador que estemos utilizando el número de bloques puede variar. En este proyecto se va a utilizar el **CY8C29466**, el cual dispone de 16 bloques digitales y 12 analógicos. Por ejemplo, cada bloque digital ocupa 8 bits. Este sistema puede operar con un clock interno configurable por parte del usuario para conseguir los tiempos deseados o, si lo que se prefiere es tener más posibilidades, podría operar con un clock externo.

Para poder programar y utilizar el microcontrolador de PsoC se necesita un KIT de evaluación. En este caso, se usará el que muestra la figura 2.2 (CY3210-PSoCEVAL1) que es totalmente compatible con el chip que se va a programar.

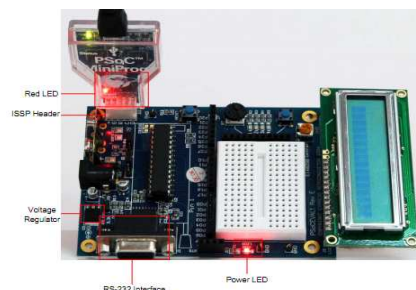


Figura 2. 2 PsoCEVAL1. Kit para utilizar el microcontrolador PSoC

Se puede observar que uno de los módulos de los que dispone es una pantalla LCD por la que se mostrarán los resultados definitivos así como mensajes de error e indicaciones de las medidas.

Para trabajar con PSoC son necesarios dos programas gratuitos. El primero de ellos es el programa de diseño llamado PSoC Designer y el segundo sirve para programar el microcontrolador y su nombre es PSoC Programmer.

PSoC Designer permite no sólo diseñar los bloques y añadir elementos, sino también escribir el código de programa ya sea en lenguaje ASSEMBLER o en C. PSoC dispone de un gran abanico documental como datasheets de cada uno de

los elementos que pueden usarse. De esta manera se le sacará el máximo rendimiento al sistema ya que estos datasheets explican al detalle cómo programarlos y para qué sirven cada una de sus funciones.

Una vez conectados todos los bloques que forman el proyecto y escrito el código del programa solamente hay que compilar, asegurarse que no tiene errores y programarlo mediante un puerto USB.

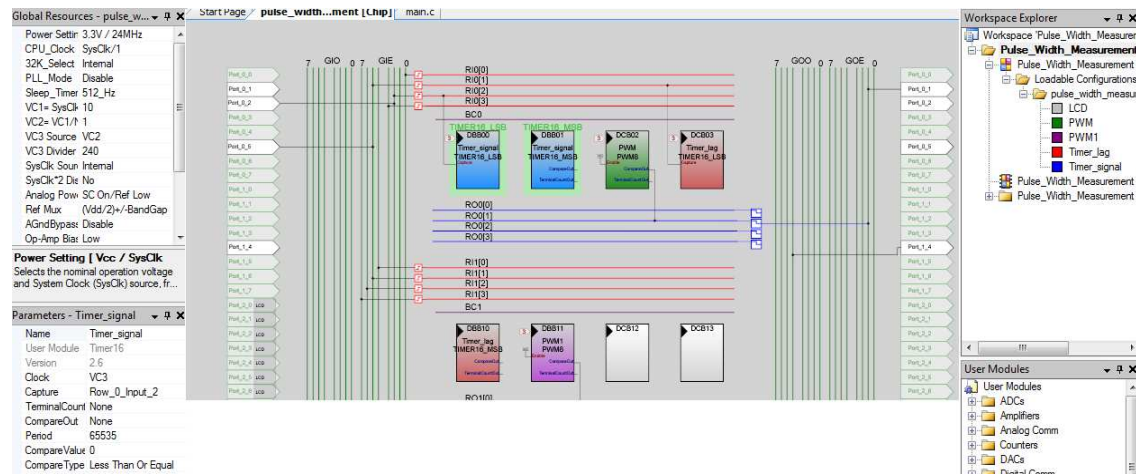


Figura 2. 3 Pantalla de diseño de PsoC Designer.

Cada uno de los cuadros de color blanco corresponde a los bloques. Los bloques de la parte superior son los digitales y los de la parte inferior, aunque no se muestran en la imagen, los analógicos. Se puede observar como algunos de los bloques están ocupados. Esto se debe a que algunos de los módulos disponibles ya están colocados en el proyecto; en este caso dos Timers de 16 bits (que ocupan 2 bloques cada uno) y dos Moduladores de pulsos (PWM) de 8 bits. La figura 2.3 muestra una visión global de la pantalla. En la parte izquierda se muestran las características globales del microcontrolador donde, por ejemplo, se puede variar la frecuencia de clock. En la parte inferior izquierda se muestran los parámetros del módulo que esté seleccionado en ese momento. Si se trata de un contador, por ejemplo, se pueden variar varios parámetros para que cuente a la velocidad que se desee. La zona de la derecha muestra dos navegadores, con el de la parte superior podemos acceder a todos los componentes del proyecto, tanto el editor del código como los módulos utilizados. La zona inferior derecha está destinada a listar todos los módulos disponibles. Para colocarlos en el proyecto únicamente hay que hacer doble-click.

Para conectar los bloques entre sí, inyectar señales externas o sacarlas al exterior se utilizan los buses de conexiones. Estos buses pueden conectar los pines deseados de los módulos a diferentes puertos. Los puertos se encuentran físicamente en el kit PSoCEVAL1. La pantalla LCD ocupa, directamente, 7 puertos que van desde el 2_0 al puerto 2_6. En esos puertos, por lo tanto, no se pueden conectar absolutamente nada.

2.4 Material de estudio: La batería

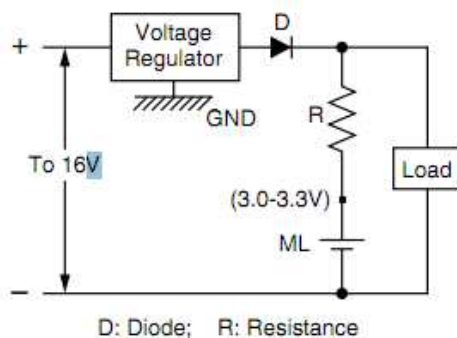
Las baterías que se van a usar en este proyecto son baterías de iones de Litio (Li-ion) con el electrodo positivo de Manganeseo. Se tratan de baterías de 3V del tipo ML2016 de MAXELL. Sus características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. 4 Características de la batería ML2016

| | |
|--|-----------------------------------|
| Modelo | ML2016 |
| Sistema | (Li-Al) Dioxido de Manganeseo |
| Tensión nominal (V) | 3 |
| Capacidad Nominal (mAh) | 25 |
| Corriente de descarga Nominal (uA) | 200 |
| Vida útil en ciclos de carga/descarga | DOD=10% => 1500 DOD=20% => 500 |
| Rango de Temperatura (°C) | Min. -20 ; Máx. +60 |
| Máx. corriente de descarga (mA) | 2.5 |
| Máx. corriente de carga (mA) | 2 |

Estas baterías están compuestas por una sola celda ya que la tensión nominal por celda de litio es de 3V.

Para cargar estas baterías el fabricante propone un circuito muy sencillo de montar compuesto por un regulador de tensión, un diodo y una resistencia, tal y como se muestra en la figura 2.4:



Example of resistance

| Model | Output Voltage of Voltage Regulator | |
|--------|-------------------------------------|------------|
| | 3.1V | 3.2V |
| ML2032 | > 550 ohm | > 600 ohm |
| ML2016 | > 550 ohm | > 600 ohm |
| ML1220 | > 1.1K ohm | > 1.2K ohm |

Figura 2. 4 Circuito de carga recomendado por Maxell

La máxima corriente circulará cuando la batería tenga un valor de tensión de 2V que es, precisamente, cuando la batería está descargada. Para encontrar el valor de la resistencia hay que tener en cuenta ese valor. La fórmula 2.1 utiliza Kirchoff [23] para encontrar el valor de R:

$$R = \frac{V_{regulador} - 2V}{2mA} \quad (2.1)$$

CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL CIRCUITO Y SIMULACIONES

En este capítulo se describe el diseño del circuito para la medición del estado de carga de la batería más la descripción del programa para el procesamiento de resultados. Se explicará cada uno de los bloques que lo forman, justificando la elección de componentes y evaluando si las señales obtenidas en cada una de las partes del circuito son las deseadas.

3.1 Diagrama de bloques

El sistema de medida que se pretende diseñar consta de 2 partes generales. La primera parte es totalmente electrónica y corresponde a un circuito que se encarga de generar una señal de unas determinadas características. Durante este capítulo se detallará qué conversiones sufrirá esta señal con el objetivo de conseguir las características idóneas para ser inyectada en la batería. La segunda parte es íntegramente de programación. Se ha diseñado un programa que es capaz de leer las señales obtenidas por el circuito y mostrar en una pantalla LCD en qué estado está la batería. Este programa se implementa en un microcontrolador del tipo PSOC y está programado en C.

El diagrama de bloques del todo el sistema se muestra en la figura 3.1:

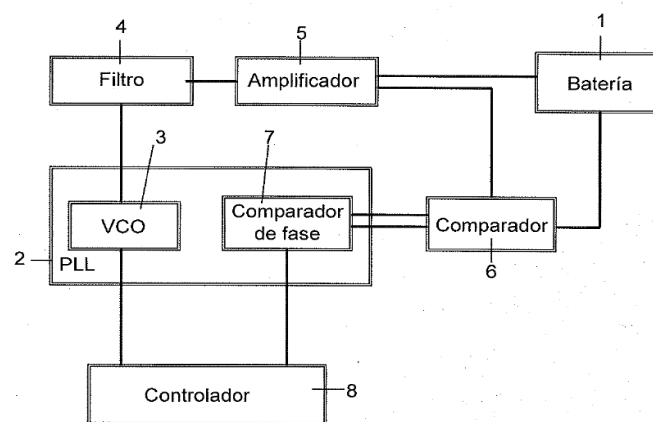


Figura 3. 1 Diagrama de bloques del sistema de medida del SoC. [25]

Como se puede observar en la figura anterior, el sistema consta de 8 bloques. Puesto que no se va a tener en cuenta el PLL como una de las partes del sistema, se analizarán el VCO y el comparador de fase trabajando independientemente.

A continuación se va a explicar brevemente la función de cada uno de los bloques:

- 1 **Batería:** Es elemento que se va a analizar. Se estudiará su comportamiento bajo unas determinadas circunstancias. Es la encargada de alimentar el amplificador de corriente permitiendo que el transistor pueda trabajar en la zona activa. Algo que se detallará en el apartado 3.2 cuando al explicar el

funcionamiento de la bomba de corriente. Se pretende que en un futuro el circuito se alimente con la misma batería.

- 2 PLL: La función de este elemento es la de poder utilizar dos de sus características de manera independiente. No va a trabajar como “bucle de enganche de fase”, simplemente se utilizarán los elementos internos que permiten este “enganche” para generar una señal estudiar el desfase que sufre.
- 3 VCO: Es uno de los elementos del PLL que se va a usar de manera diferente a la que es habitual. Es un oscilador controlado por tensión, lo que significa que dependiendo del valor de tensión que se le aplique oscilará a una frecuencia determinada. Es el oscilador ideal para nuestro circuito ya que tenemos que generar señales a diferentes frecuencias (1Hz, 10 Hz y 100Hz). Que esté controlado por una tensión continua permite variar la frecuencia con un simple potenciómetro. Los detalles de funcionamiento del VCO se verán en el apartado 3.2.
- 4 Filtro: Se trata de un filtro paso-bajo. Como ya se apuntó en el anterior capítulo, el PLL utilizado en este proyecto es digital. Esto supone que no genere una señal senoidal sino una señal digital, o lo que es lo mismo, una señal cuadrada (TTL- oscila entre 0 y 5V-) compuesta por pulsos. Si se quieren ver las variaciones de la impedancia interna, es necesario que la señal inyectada sea senoidal ya que la definición de fase viene dada para este tipo de ondas. Puesto que toda señal cuadrada es la suma de varias senoidales a frecuencia múltiplo de la fundamental, se diseña un filtro que elimine todas las frecuencias múltiplo excepto la fundamental.
- 5 Amplificador: Debido a que la impedancia de las baterías puede ser muy baja, se necesita un amperaje bastante alto para que haya una caída de tensión y la onda senoidal no se atenúe. Los integrados del circuito no son capaces de entregar tanta intensidad, así que se necesitará un circuito amplificador que respete el valor de amplitud de la señal y amplifique únicamente su corriente.
- 6 Comparador: En primer lugar se genera una señal digital a una determinada frecuencia que se convierte a analógica respetando dicha frecuencia. Se inyecta a la batería y, para que pueda compararse su fase, necesita ser digitalizada. Este bloque se encarga de convertir la señal inyectada a la batería y la señal que sufre el desfase (la que sale de la batería) de analógico a digital. Se utilizan operacionales a modo de comparador.
- 7 Comparador de fase: Es el segundo elemento del PLL que se va a utilizar. Es una puerta lógica OR-exclusiva (XOR) que se encarga de comparar dos señales digitales. Estas dos señales son las que nos entrega el bloque comparador. Una XOR entrega un ‘1’ (5V) cuando las dos señales no tienen el mismo valor. Esto significa que, a la salida del comparador de fase, tendremos una señal con pulsos de duración igual al tiempo que estén ambas señales desfasadas.
- 8 Controlador: Es el sistema adyacente que se encargará de determinar el Estado de Carga (SoC) de la batería. Se trata de un bloque compuesto por un microcontrolador al que se le inyectarán dos señales; la primera de ellas

corresponde a la señal de entrada del comparador de fase y la segunda es su salida. El controlador comparará ambas señales y determinará, dependiendo de los grados de desfase, el Estado de Carga (SoC). El encargado de realizar esta tarea es el programa en C introducido en el microcontrolador de PSOC.

3.2 Circuito para la medición del estado de carga (SoC).

En este apartado se pretende explicar el funcionamiento de cada uno de los bloques que forman el circuito diseñado justificando la elección de componentes mediante los cálculos pertinentes.

En el Anexo1 se explicará el diseño de un circuito que optimizará las medidas realizadas en el laboratorio conmutando entre diferentes componentes. Como ya se ha comentado en los bloques de VCO y FILTRO, se generarán 3 señales cuadradas a diferentes frecuencias (1,10 y 100 Hz) que se filtrarán para obtener señales senoidales. El circuito propuesto permitirá variar la frecuencia sin necesidad de manipular los valores de los componentes.

En este apartado también se realizarán simulaciones con el software Orcad Pspice 9.1 y Proteus. Esto servirá para comprobar que los cálculos son correctos y que el circuito funcionará perfectamente a la hora de montarlo.

A continuación, se muestra el esquema general del circuito para la medida del SoC dividido en 4 circuitos (A,B,C y D) que comprenden los 8 bloques explicados en el apartado anterior (figura 3.2). Este circuito está formado por los bloques que van desde el 1 hasta el 7. El bloque Controlador corresponde al sistema de procesamiento de datos que se explicó en el apartado 2.3. Al ser un sistema independiente, no se ha incluido en el esquema teórico por lo que se detallará más adelante. Los valores de los componentes que se muestran en la figura son para una señal senoidal de 10Hz.

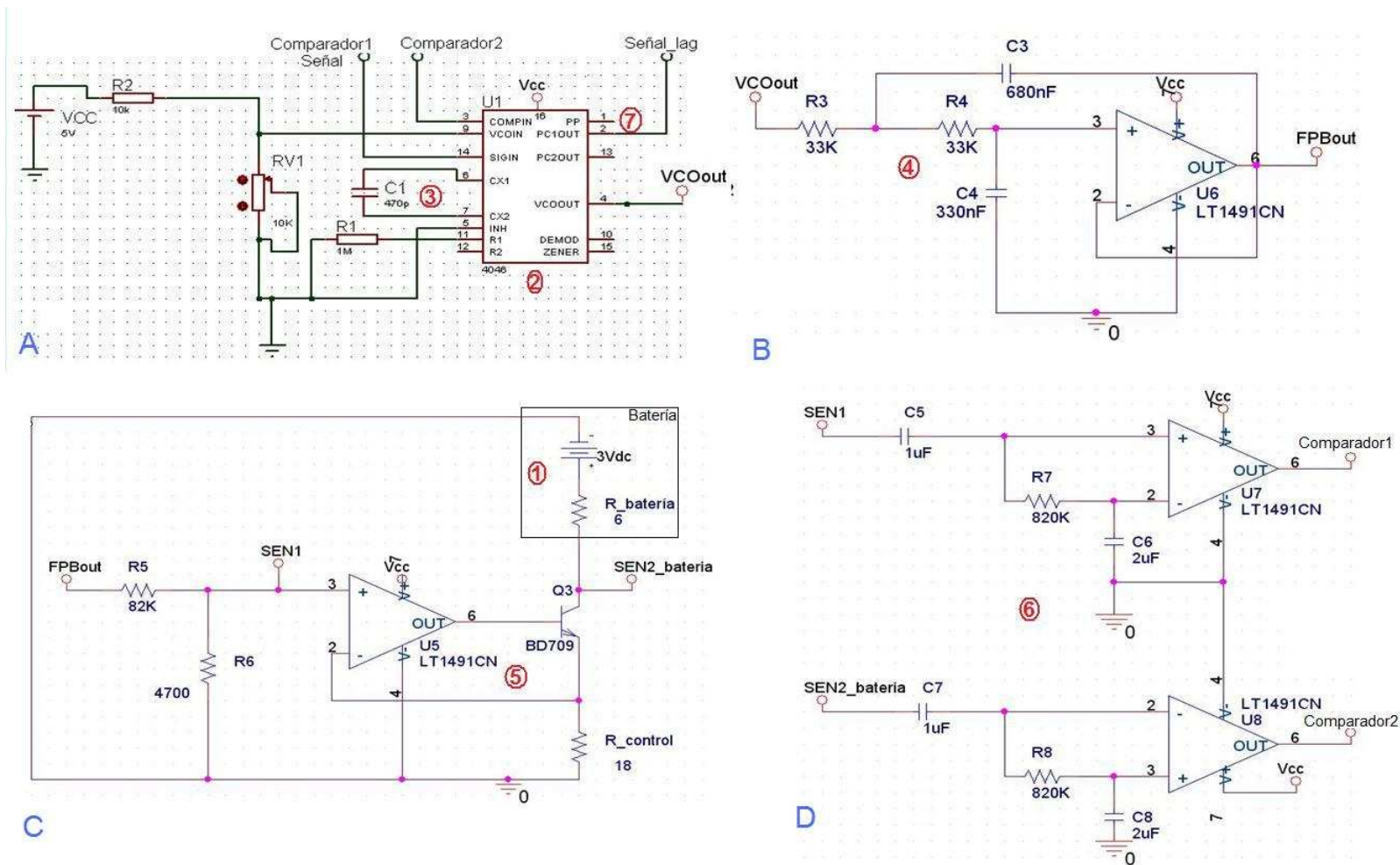


Figura 3. 2 Esquema teórico del circuito de medida del SoC realizado con PSPICE y PROTEUS. Hay 4 circuitos principales nombrados en azul que comprenden 7 bloques. El “A” es el PLL (VCO+comparador de fase), el “B” corresponde al filtro Sallen-Key, el bloque “C” es el circuito amplificador de corriente y, por último, el “D” es el convertor analógico-digital hecho a base de comparadores.

3.2.1 Circuito para generar la señal

En el apartado de diagrama de bloques se apuntaba que, mediante un oscilador controlado por tensión (VCO), se genera la señal que posteriormente se inyecta en la batería.

Este oscilador está integrado en un PLL digital llamado **HEF4046** (bloque 2) y corresponde al bloque número 3 de la figura 3.2. Los componentes **R1 y C1** son los encargados de determinar en qué rango de frecuencias trabajará el VCO. Como son 3 señales (1, 10 y 100Hz) se ha decidido que el rango sea desde 0Hz hasta 2KHz.[21]

A modo de resumen, la siguiente tabla mostrará los valores de todos los componentes así como las conexiones de los pins más relevantes y las frecuencias del VCO.

Tabla 3. 1 Valores y conexiones más relevantes del PLL

| | |
|---|-----------------|
| f_o (frec. Central) | 1KHz |
| f_{min} | <1Hz |
| f_{max} | 2KHz |
| V_{DD} (pin 16) | 5V |
| V_{SS} | 0V (masa) |
| C1 (pins 6 y 7) | 470 pF |
| R1 (pin 11) | 1 M Ω |
| R2 (pin 12) | ∞ |
| INH (pin 5) | V_{SS} (masa) |

Una vez que los márgenes de oscilación ya están definidos hay conseguir que el VCO oscile a la frecuencia deseada. Es un oscilador controlado por tensión, por lo que dependiendo de la tensión que se le aplique a su entrada V_{COIN} oscilará a una frecuencia u otra.

La tensión que controla la frecuencia de oscilación tiene una relación directa con la tensión de alimentación V_{DD} . Para que oscile a la frecuencia central (f_o) el valor de V_{COIN} tiene que ser $1/2 V_{DD}$. Con $V_{COIN} = V_{DD}$ oscilará a f_{max} .

Se usará un divisor de tensión (figura 3.3) para variar la frecuencia de oscilación. Según la ley de Kirchoff de las mallas [23], la suma de las tensiones de las dos resistencias será igual a la tensión total ($V_{R1} + V_{R2} = V_{in}$).

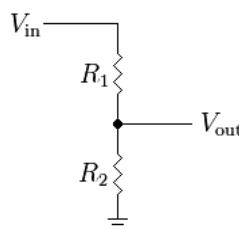


Figura 3. 3 Divisor de tensión.

La fórmula directa del divisor de tensión para este caso sería:[23]

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.1)$$

Tras aplicar la fórmula 3.1, la relación de resistencias para que oscile a la frecuencia central, cumpliéndose que $V_{CO_{IN}}=1/2V_{DD}$, es **R1=R2**.

Colocaremos una **R1=10K** más un **potenciómetro de 10K**. Por lo tanto, el margen de oscilación será de <1Hz a 1KHz (f_0). En el circuito (figura 3.2) R1 se llamará R2 y R2 será la resistencia variable RV1.

A modo de ejemplo, se muestra a continuación una simulación del tipo de señal que genera el VCO oscilando una frecuencia de 10 Hz:

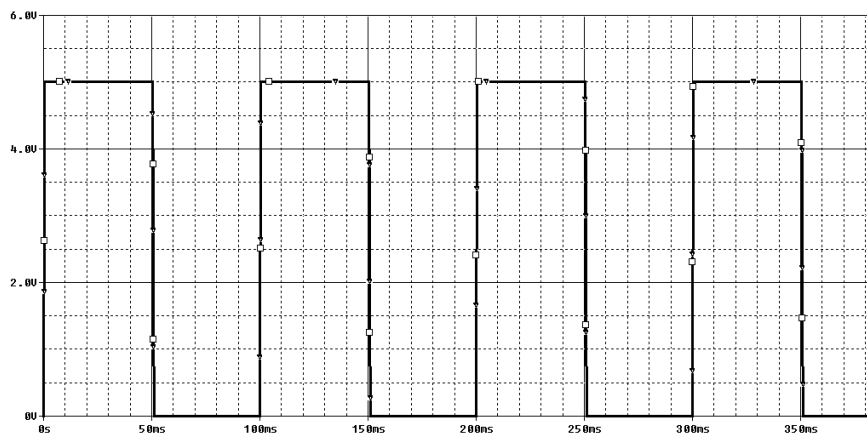


Figura 3. 4 Simulación en PSPICE de la salida del VCO. Se obtiene una señal cuadrada de 10Hz/5V.

3.2.2 Filtro para convertir la señal cuadrada en senoidal

Como lo que se pretende es inyectar una señal analógica senoidal en la batería hay que convertir la onda que nos entrega el VCO. Como ya se apuntó en el apartado 3.1, una onda cuadrada es la suma de varias ondas senoidales con frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental. Lo que se necesita es, precisamente, la senoidal cuya frecuencia es la fundamental; en este caso, 10 Hz.

Para conseguir una onda senoidal a partir de una onda cuadrada se usará un filtro paso-bajo. A partir de la frecuencia de corte, la respuesta en frecuencia de un filtro obedece a la siguiente relación:

$$\begin{aligned} &6n \text{ dB/octava} \\ &20n \text{ dB/década} \\ &\text{Donde } n = \text{orden del filtro} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Viendo esto, montar un **filtro activo de segundo orden** parece una solución adecuada para obtener la senoidal. La configuración de filtro **Sallen-Key** es una buena opción debido a su sencillez de montaje y de cálculo. El bloque número 4 de

la figura 3.2 muestra la estructura de un filtro paso-bajo de segundo orden del tipo sallen-key.

Ha sido necesaria la colocación de un operacional del tipo **Rail-to-rail** como el **LT1491CN**, cuya principal característica es que son capaces de entregar en la salida valores muy cercanos a las tensiones de alimentación. Con la alimentación de +5V y 0V, un operacional que no sea rail-to-rail no sería capaz de entregarnos una senoidal con valores mínimos tan próximos a 0V que es, precisamente, el valor que tiene un semiciclo de la señal cuadrada que proviene del VCO. De hecho, en las pruebas de laboratorio, la señal salía recortada en su semiciclo negativo porque no podía alcanzar valores de tensión tan pequeños.

En la configuración paso-bajos, la frecuencia de corte del sallen-key viene definida por la siguiente fórmula: [18]

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$$

$$R_1 = R_2 = R \Rightarrow C_2 = C \Rightarrow C_1 = 2C \quad (3.3)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R^22C^2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi RC} = \frac{1}{8,9RC}$$

Hay que tener en cuenta que el estudio se va a realizar con señales a 3 frecuencias diferentes, lo que quiere decir que el filtro necesitará 3 frecuencias de corte, una por cada una de las señales que genere el VCO. Esto significa que la variación de frecuencia debe ser una tarea sencilla, por lo que se ha simplificado la fórmula anterior decidiendo que $R_1=R_2$ y $C_1=2C_2$ y así manejar sólo un valor de R para cada frecuencia de corte. El circuito del Anexo 1 permite variar la frecuencia de corte sin manipular el circuito ya montado.

Los valores de los componentes para las diferentes frecuencias serán los siguientes:

- $C = 330nF \Rightarrow 2C = 660nF \approx 680nF$
- Frecuencia de corte de 1Hz: **R=340 KΩ ≈ 330 KΩ**
- Frecuencia de corte de 10Hz: **R=34 KΩ ≈ 33 KΩ**
- Frecuencia de corte de 100Hz: **R=3400 Ω ≈ 3K3**

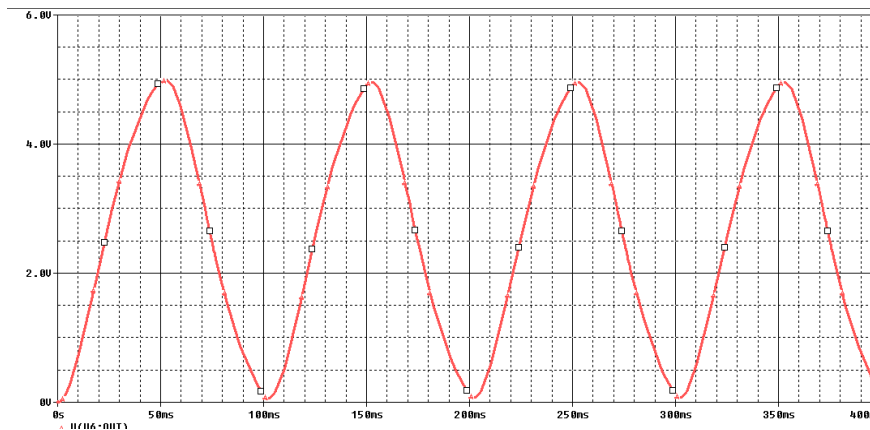


Figura 3. 5 Simulación de PSPICE de la señal de salida del filtro con $f_c = 10\text{Hz}$.

3.2.3 Circuito amplificador de corriente

La resistencia interna de la batería es de valor muy bajo. Esto implica que la corriente de la señal inyectada tiene que ser lo suficientemente alta como para que esa señal esté presente en los bornes de la batería. Esta última frase obedece a la ley de Ohm donde $V = I \cdot R$ [23]. Si queremos mantener la tensión (V) con una resistencia muy baja, habrá que aumentar la corriente (I). De lo contrario la tensión se verá atenuada.

La señal que tenemos en este punto es la que proviene del filtro Sallen-Key. Aunque es un filtro activo, el operacional que lo compone no es capaz de entregarnos la corriente necesaria. Ese integrado (LT1491CN) tiene una Intensidad de cortocircuito de 25mA y en este circuito es muy probable que se necesite hasta 1A.

Así que, para hacer frente a la demanda de corriente que tendrá la batería, se propone intercalar un circuito amplificador de corriente compuesto por un transistor y un amplificador operacional. Este circuito está basado en el circuito llamado bomba de corriente [3]. Para entender cómo amplifica se podría decir que pequeñas variaciones de tensión en la base del transistor provocan grandes variaciones de intensidad en el colector.

Hay que tener en cuenta la amplitud de la señal que vamos a inyectar en la batería. La salida del filtro nos entrega una señal senoidal positiva como la que se muestra en la figura 3.5. Este nivel de amplitud es demasiado alto para la batería ya que se pretende estudiar sus variaciones de fase sin influir en su proceso de carga o descarga, así que hay que atenuarla por un factor 20. El circuito amplificador de corriente corresponde al bloque 5 del circuito general de la figura 3.2 y puede observarse que la bomba de corriente consta de un transistor NPN y de un operacional. Además, en la entrada '+' del operacional hay un divisor de tensión que ejerce de atenuador. Los valores de las resistencias R5 y R6 entregan una onda positiva del mismo tipo que la figura 3.5, pero con $V_{\text{max}} = 270\text{mV}$. La fórmula 3.1 del divisor de tensión demuestra esta relación. La corriente consumida por los elementos pasivos del atenuador no es un problema debido a que posteriormente se amplificará la corriente de la señal resultante.

3.2.3.1 Polarización del transistor

La misión del amplificador operacional es la de polarizar el transistor. La configuración del amplificador operacional es de “seguidor de tensión”. Esta configuración se utiliza como buffer para aislar circuitos o adaptar impedancias (tiene una $Z_{in}=\infty$) y consiste en realimentar negativamente el operacional para que proporcione en su salida la misma tensión que hay en su entrada ‘+’.

La realimentación negativa del operacional se hace a través del transistor, concretamente a través del diodo de base-emisor (figura 3.2). Para que se cumpla la regla básica de la realimentación negativa y que $I_N^- = I_N^+$ en el operacional, el transistor tiene que estar polarizado y trabajando en su zona activa. Esta polarización se cumple en base a dos fórmulas: [24]

$$I_{Emisor} = I_{Base} + I_{colector} \quad (3.4)$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \quad (3.5)$$

El amplificador operacional es el encargado de entregar la tensión adicional para polarizar el transistor debido a la baja amplitud de la senoidal. Así, la tensión de salida del operacional será mayor que la V_{BE} . Le añadirá un Offset para que el diodo siempre se encuentre en la zona de trabajo. La explicación es que para cumplirse la realimentación negativa el transistor necesita estar polarizado, así que el operacional necesita amplificar la senoidal y así llegar a realimentarse. Entonces, la señal de entrada estará presente en el emisor con el mismo valor de tensión pero amplificada en intensidad.

Como ya ocurría en el caso del filtro sellen-key, también se utilizará un amplificador operacional del tipo **rail-to-rail** ya que en su salida tiene que entregar niveles muy próximos a 0V, como se puede comprobar en la figura 3.5.

3.2.3.2 Simulación del amplificador de corriente incluyendo la batería

Tal y como se comentó en el apartado 2.4, la batería que se va a estudiar es la ML2016 de Maxell. Se aprovechará como fuente de corriente para amplificar la señal alterna, alimentando el transistor a +3V.

El transistor elegido para amplificar la corriente es el NPN de potencia **BD709**. Sus características principales son que puede entregar una intensidad máxima de colector de 12A y disipar una potencia de 75W. Puede llegar a alcanzar una temperatura máxima de 150°C. Observando los consumos de la tabla 3.2 se comprueba que este modelo es capaz de entregar las intensidades que el circuito demanda. Para evitar sobrecalentamientos y conservar la placa de montaje en buenas condiciones, es recomendable acoplar un disipador de temperatura al transistor por si los consumos provocan que el transistor se caliente demasiado, aunque depende del valor de $R_{control}$.

Como la señal que llega a la base es positiva, es imprescindible que el transistor sea del tipo NPN para que el sentido de la corriente vaya de colector a emisor.

La resistencia R_{control} regula la corriente que circula de colector a emisor, variando su valor se reducirá o aumentará el consumo. Hay que elegir un valor óptimo para que la señal senoidal llegue a la batería.

En un principio, se pretendía simular el circuito con una R_{control} de 0.2Ω para mostrar el peor de los casos pero, teniendo en cuenta que la componente continua de la onda en este punto es de 135mV ($V_{\text{max}}=270\text{mV}$), el consumo alcanzaría los 1.3A y la batería se descargaría en cuestión de 1.5 min . Así que, debido a la poca capacidad de la batería (25mAh), se ha optado por colocar una R_{control} de 18Ω (figura 3.2) y reducir así la corriente de colector. Esta modificación es posible porque la resistencia interna de la batería es del orden de 6Ω [6], por lo que no es necesaria tanta intensidad para que la senoidal esté presente en sus bornes.

Para comprobar que la configuración del circuito funciona correctamente, se simula el circuito amplificador con Orcad Pspice. Se muestran los resultados de las medidas de tensión y corriente (DC) en la tabla 3.2:

Tabla 3. 2 Tensiones e intensidades en DC (excepto $V_{3\text{max}}$) de la Bomba de corriente con la batería.

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------|---------------------|
| FPB_{out} | 2.5 V | V_{CE} | 2.82 V |
| $V_{3\text{max}}$ | 270mV | V_{CB} | 2.236V |
| V_3 | 135.5 mV | I_B | 107.6 μA |
| V_E | 135.4 mV | I_C | 7.417 mA |
| V_{BE} | 584.3 mV | I_E | 7.525 mA |

Puede comprobarse que estos resultados cumplen con las ecuaciones de polarización del transistor de las formulas 3.4 y 3.5.

Debido al aumento de la resistencia de control, los consumos han descendido de manera muy considerable. Esto permitirá que las medidas del SoC no provoquen una pérdida sustancial en la carga de la batería y así adular lo menos posible los resultados finales.

Comprobamos la señal del colector, que será precisamente la señal inyectada en la batería, y la comparamos con la entrada del amplificador de corriente:

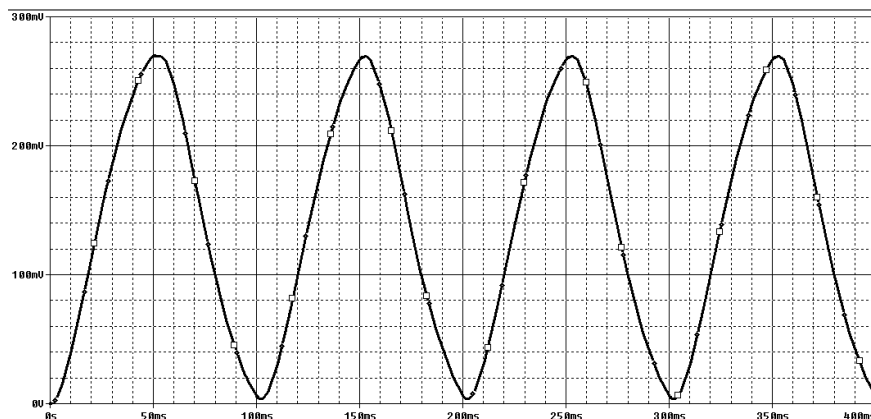


Figura 3. 6 Simulación en Pspice de la señal de entrada del amplificador de corriente (v_3). Se comparará con la salida.

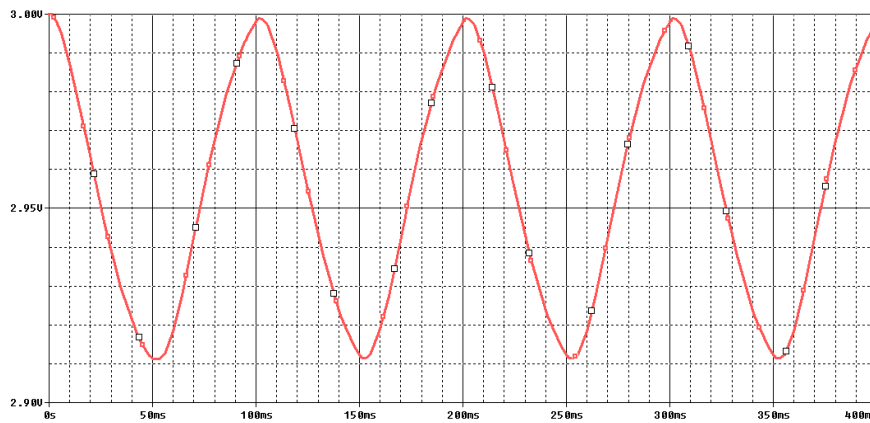


Figura 3. 7 Simulación en PSPICE de la señal senoidal que llega a la batería (V de colector). Está desplazada debido a la tensión continua de la propia batería(3V).

Se observa en la figura 3.7 que su amplitud ha disminuido respecto a la entrada, aunque es suficiente para inyectarlo en la batería y percibir sus cambios. Esto se debe al valor de $R_{\text{batería}}$. Cuando la resistencia interna de la batería aumente, también aumentará la amplitud de esta señal.

La configuración del amplificador es muy semejante a la del amplificador en Emisor Común (E.C), donde la entrada se aplica entre base y emisor y la salida se obtiene entre colector y emisor; únicamente se diferencian en la manera de polarizarse. Una de las características principales del amplificador en E.C es que su salida (colector) siempre está invertida 180° respecto a su entrada (base). Si se comparan las figuras 3.6 y 3.7, se puede observar que también ocurre este fenómeno en la configuración utilizada en este proyecto.

Se analiza sólo las componentes alternas de la señal en el circuito amplificador. La entrada será la señal de la base (llamémosla v_i). Como v_i lleva asociada una variación de la corriente de base (i_b), implica variaciones en V_{CE} y por lo tanto, variaciones en su componente alterna v_{ce} . Cuando v_i aumenta provoca un deslizamiento hacia la región de saturación que implica una disminución de v_{ce} , alcanzando su valor mínimo cuando v_i tiene su valor máximo y viceversa. Esto hace que la salida (colector) esté desfasada 180° respecto a la entrada.[24]

3.2.4 Conversor A/D y detector de fase.

Para poder analizar el desfase que sufre la señal senoidal al inyectarse en la batería, es necesaria su conversión de analógico a digital ya que el comparador de fase integrado en el chip PLL sólo funciona con ese tipo de señales. Los convertidores entregarán 2 señales cuadradas del mismo tipo que la señal de salida del VCO (figura 3.4) respetando la frecuencia de la senoidal y manteniendo el desfase sufrido a causa de la impedancia de la batería.

El bloque 6 de la figura 3.2 muestra que esta conversión se hará mediante dos comparadores y dos filtros paso-bajo. Un comparador es un amplificador operacional que compara dos señales, la de su entrada '+' con la de su entrada '-'. En el momento en que el nivel de la entrada '+' supera la entrada '-', el operacional se satura y entrega, a su salida, la tensión de alimentación positiva (V^+). Cuando

las entrada '+' es inferior, entrega la tensión de alimentación negativa (V). Si se alimenta a +5V y 0V, ya se tiene una señal digital..

Para digitalizar estas señales hay que compararlas con su componente continua. Para ello se tiene que colocar un filtro paso-bajo en la entrada '-' que eliminará todas las componentes frecuenciales conservando, únicamente, su componente continua.

Hay dos señales a digitalizar. Una de ellas es la que proviene de la batería (salida del amplificador de corriente) y la otra es la entrada al amplificador de corriente del apartado anterior, o lo que es lo mismo, la señal senoidal de la entrada '+'. Hay que recordar que la señal que proviene de la batería está desfasada 180° respecto a la de la entrada de la bomba de corriente. Esta contrafase hay que corregirla para poder comparar realmente qué desfase sufre a causa de la batería. La manera de corregirlo es que, en el comparador, su entrada '+' sea la componente continua y su entrada '-' la senoidal. De esta manera, entregará a su salida la V⁺ si la senoidal es inferior a su componente continua, invirtiendo así la señal.

En la figura 3.2 se observan condensadores de 1 μF (C5 y C7). Su función es la de eliminar la componente continua de la señal y permitir solamente el paso de la componente alterna. Entonces el filtro paso-bajo, que se encarga de eliminar la componente alterna y permitir el paso de la continua, entregará una señal de 0V en vez de una señal continua de un valor determinado. Estos 0V serán la referencia para comparar la senoidal. Los valores de R y C del filtro paso-bajo, para una frecuencia de corte de 0.1Hz, son de **820 KΩ** y **2 μF** respectivamente y obedecen a la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.6)$$

A modo de ejemplo, sólo mostraremos los resultados de la simulación en el comparador2, que es el que digitaliza la señal que proviene de la batería y, por lo tanto, la tiene que invertir. La salida del comparador1 será igual que la del comparador2 aunque adelantada en fase a causa de la impedancia interna de la batería.

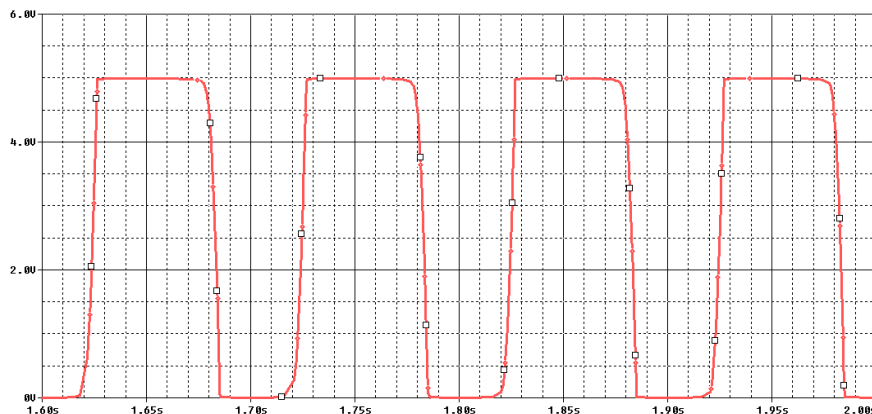


Figura 3. 8 Simulación en PSPICE de la salida del comparador2 invertida respecto a su entrada. Señal digital para compararla en el detector de fase.

Las salidas de ambos comparadores son las señales que debemos introducir en el comparador de fase del PLL. El comparador de fase 1 corresponde a una puerta lógica XOR, cuya tabla de la verdad es la siguiente:

Tabla 3. 3 Tabla de la verdad de la puerta lógica OR-exclusiva (XOR). [2]

| IN A | IN B | OUT $A \oplus B$ |
|------|------|------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

Según su tabla de la verdad, en los instantes en que ambas señales tengan el mismo nivel de tensión, ya sea 0V ó 5V (0 ó 1), la salida del comparador de fase será 0V (0). Nos entregará un 1 (5V) cuando sus entradas tengan niveles diferentes. Asimismo, la figura siguiente muestra el tipo de señal que habrá en la salida del comparador de fase.

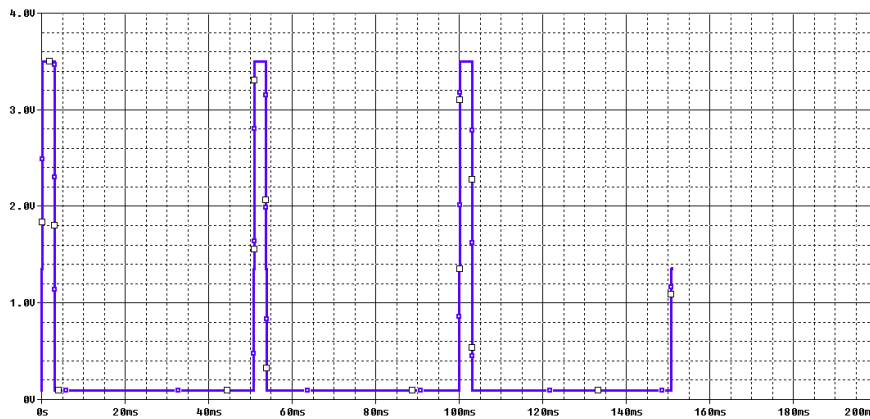


Figura 3. 9 Señal de salida del comparador de fase. Ancho de pulso igual al tiempo de desfase

Para realizar el estudio del Estado de Carga (SoC) de la batería, habrá que registrar el valor del ancho de pulso de esta señal en varios instantes del proceso de carga y de descarga. Con una sencilla regla de tres, determinaremos los grados de desfase equivalentes a los tiempos de pulso registrados y se relacionarán con estados de carga conocidos. De esta manera, se obtiene una gráfica (capítulo 4) con el desfase que sufrirá la señal para todo el rango del Estado de Carga (SoC). Los datos obtenidos se introducirán a unos vectores de un programa en C para un microcontrolador que decidirá, cuando le inyectemos las señales y en función del ancho de pulso que mida, el SoC. Para medirlo, habrá que inyectar al microcontrolador la señal de salida del detector de fase y una de sus señales de entrada, no importa cual.

3.2.5 Controlador

Este bloque del sistema de medida no forma parte del circuito. Es un sistema adyacente que se encarga de leer las señales procedentes de la entrada y la salida del detector de fase. Decide el Estado de Carga comparando el ancho de pulso de la salida del comparador de fase con los datos de los ensayos de laboratorio guardados en sus vectores de memoria que se han introducido manualmente en el programa.

Podría decirse que se crea un perfil para cada batería en base a unos ensayos en el laboratorio. Los datos obtenidos se introducen en el programa y posteriormente, cuando usamos el circuito de medida, el programa recurre a ese perfil para determinar el SoC de esa batería.

Hay que generar un perfil con cada una de las tres frecuencias de test (1, 10 y 100Hz), introduciendo en el programa el Estado de Carga para cada uno de los desfases que se hayan medido. Contra más medidas se hagan en el laboratorio más preciso será el sistema.

En el apartado 2.3 ya se ha explicado en qué consiste este sistema controlador. Se le ha llamado “sistema de procesamiento de resultados” y esta basado en microcontroladores de PSOC. De ahí que en este apartado se hable del código del programa para determinar el SoC y del diseño de sus componentes en PSOC Designer.

3.2.5.1 Necesidades del programa

El circuito de medida de la figura 3.2 nos entrega dos señales que inyectaremos en PSOC. Una de ellas es la salida del comparador de fase a la que llamaremos ‘señal_lag’. Son pulsos con un ancho equivalente al desfase producido por la batería (figura 3.9). La otra es la conversión a digital de la senoidal que se inyecta en la batería y que se encuentra en la entrada del comparador de fase, es la salida de comparador1 y su nombre será ‘señal’. Tiene el mismo aspecto que la figura 3.8 pero sin estar desfasada.

El programa tiene que determinar el SoC a partir de estas dos señales. Para conseguirlo tiene que medir el ancho de pulso de ‘señal_lag’ y compararlo con los datos introducidos a raíz de los ensayos de laboratorio. Los ensayos se realizan con tres señales por lo que habrá 6 vectores con datos, dos por cada una de las señales (1, 10 y 100Hz). Corresponden a las medidas de los anchos de pulso (vector1) y a los estados de carga (SoC) para cada una de las medidas realizadas (vector2).

Para que el programa pueda buscar el valor del ancho de pulso en el vector1 correspondiente, es necesario conocer con qué señal se esta realizando esa medida. Para ello hay que medir el ancho de pulso de ‘señal’ y determinar su frecuencia. Una vez conocida la frecuencia de la señal de test (será 1, 10 ó 100Hz), el programa podrá buscar el valor de ancho de pulso de ‘señal_lag’ en el vector1 de la frecuencia correspondiente.

Cuando se localice el valor de ancho de pulso exacto o, en su defecto, el más próximo, el programa guardará, en una variable, la posición del vector1 y mostrará por la pantalla LCD el valor de esa misma posición en el vector2, que corresponde al SoC para ese ancho de pulso, o lo que es lo mismo, para ese desfase.

Viendo estas necesidades se propone programar 2 Timers, uno para cada señal. Estos Timers determinarán sus tiempos de pulso. Para ello, hay que prestar especial atención a sus parámetros ya que simplemente son contadores y, dependiendo de la frecuencia a la que cuenten, el tiempo que marquen puede ser desde microsegundos hasta segundos. Los Timers se llaman 'Timer_signal', para determinar el ancho de pulso de 'señal', y 'Timer_lag' para 'señal_lag'. La siguiente figura muestra los bloques y conexiones de los Timers en la pantalla de diseño de PSOC:



Figura 3. 10 Timers y conexiones en PSOC.

Puede observarse en la figura anterior cómo se inyectan las señales a los Timers a través de los puertos físicos 0_2 y 0_5. Son Timers de 16 bits, lo que significa que ocupan 2 bloques de 8 bits cada uno (azul y rojo). Al ser de 16 bits implica que pueden contar hasta 2^{16} (65536) y su clock marcará la velocidad a la que cuentan.

Puede comprobarse también que hay 2 bloques llamados PWM y PWM1. Estos dispositivos son moduladores de pulsos. Son parte implícita de este proyecto, aunque únicamente se han usado para simular las señales reales externas, por lo que no se usarán en las medidas reales.

3.2.5.2 Parámetros y funcionamiento de los componentes

Como ya se ha comentado, los parámetros de los componentes de PSOC son parte muy importante a la hora de entender sus procesos. En primer lugar, hay que definir los parámetros globales (figura 3.11) y después los de cada uno de los componentes.

| Global Resources - pulse_width_measurement | |
|--|------------------|
| Power Setting [Vcc / SysClk freq] | 3.3V / 24MHz |
| CPU_Clock | SysClk/1 |
| 32K_Select | Internal |
| PLL_Mode | Disable |
| Sleep_Timer | 512_Hz |
| VC1= SysClk/N | 10 |
| VC2= VC1/N | 1 |
| VC3 Source | VC2 |
| VC3 Divider | 240 |
| SysClk Source | Internal |
| SysClk*2 Disable | No |
| Analog Power | SC On/Ref Low |
| Ref Mux | (Vdd/2)+/BandGap |
| AGndBypass | Disable |
| Op-Amp Bias | Low |
| A_Buff_Power | Low |
| SwitchModePump | OFF |
| Trip Voltage [LVD (SMP)] | 4.81V (5.00V) |
| LVDThrottleBack | Disable |
| Watchdog Enable | Disable |

PARÁMETROS MÁS RELEVANTES

Power Setting: La tensión de alimentación y la frecuencia de oscilación del clock del sistema. El clock sirve para sincronizarse y es una señal cuadrada que oscila entre 0 y 1.

VC1, VC2 y VC3= Son divisores del clock del sistema y se utilizan para disminuir la frecuencia. Los componentes usarán como clock uno de estos 3 valores.

SysClk Source: Elegir si el clock viene dado por la CPU o por un oscilador externo.

Figura 3. 11 Parámetros globales de PSOC

A la hora de decidir qué parámetros tendrán los Timers, hay que tener en cuenta qué clock usará porque marcará la velocidad con la que contará. En la siguiente figura se muestran los parámetros para ambos Timers:

| Parameters - Timer_signal | | Parameters - Timer_lag | |
|---------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| Name | Timer_signal | Name | Timer_lag |
| User Module | Timer16 | User Module | Timer16 |
| Version | 2.6 | Version | 2.6 |
| Clock | VC3 | Clock | VC3 |
| Capture | Row_0_Input_2 | Capture | Row_0_Input_1 |
| TerminalCountOut | None | TerminalCountOut | None |
| CompareOut | None | CompareOut | None |
| Period | 65535 | Period | 65535 |
| CompareValue | 0 | CompareValue | 0 |
| CompareType | Less Than Or Equal | CompareType | Less Than Or Equal |
| InterruptType | Capture | InterruptType | Capture |
| ClockSync | Sync to SysClk | ClockSync | Sync to SysClk |
| TC_PulseWidth | Full Clock | TC_PulseWidth | Full Clock |
| InvertCapture | Normal | InvertCapture | Normal |

Figura 3. 12 Parámetros de los Timers utilizados.

Como se muestra en la figura 3.12, el clock utilizado es VC3 que, según la figura 3.11, corresponde a una frecuencia de **10KHz** (hay que dividir *Sysclk* entre los divisores de VC1, VC2 y el propio VC3). El periodo indica el número máximo de ciclos que puede contar (se ha puesto el máximo periodo posible para este tipo de Timer). “Capture”, en cambio, indica por qué bus le entra la señal que tiene que medir. Las salidas del Timer como “TerminalCountOut” y “CompareOut” no se utilizan en este proyecto ya que sólo se pretende conocer el tiempo de pulso; el Timer no tiene que actuar en ningún momento ni activar ningún otro circuito. Es importante indicarle qué señal va a forzar que se active o desactive. Para ello se usa el parámetro *InterruptType*, donde le indicamos que la señal que provocará su activación será la propia señal que queremos medir, en este caso la que entra por “capture”.

La mecánica de funcionamiento del Timer para este proyecto es la siguiente: un Timer simplemente es un contador que se basa en la cuenta de flancos de subida (pulsos) de la señal de clock. Cuenta los pulsos del clock de uno en uno hasta llegar al máximo o hasta que haya una orden de detención. A través del código de programa se le indica al Timer cuándo tiene que empezar a contar, que es justo en el momento en que la señal que queremos medir (**'señal'** ó **'señal_lag'**) tiene un flanco de subida (el inicio del pulso). A partir de ese momento, el Timer contará periodos de clock hasta que le digamos que se detenga, que será al final del pulso, o lo que es lo mismo, en el flanco de bajada. El número de periodos que haya contado corresponde al ancho de pulso (PulseWidth). Por lo tanto, para saber el tiempo de duración del pulso, simplemente hay que multiplicar el número resultante de la cuenta del Timer por el periodo de la señal de clock de 10KHz (10^{-4} s). Cuanto mayor sea la frecuencia del clock más precisa será la medida de Pulsewidth. El inconveniente es que, si la frecuencia es muy alta, es posible que se alcance el periodo máximo que el Timer es capaz de contar.

En el Anexo 2 se adjunta el código completo, con sus respectivos comentarios, explicando las partes más importantes del programa. De esta manera se entenderá mejor la explicación de funcionamiento.

El circuito completo se muestra en la figura 3.13. Está formado por el circuito de medición del SoC, el controlador (PSOC) y el circuito adyacente para conmutar entre las diferentes señales que se inyectarán en la batería y que se explica en el anexo 1.

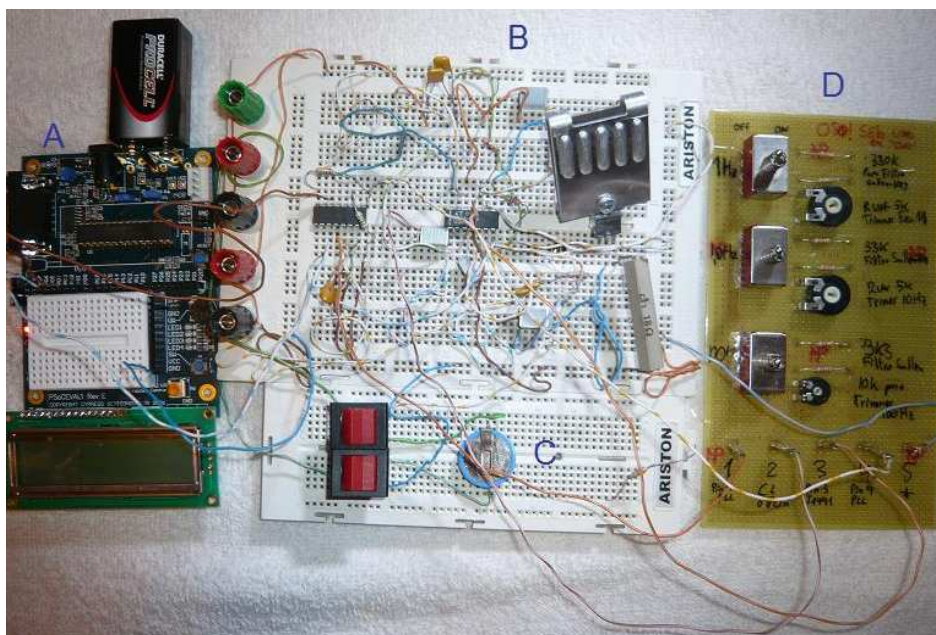


Figura 3. 13 Circuito de medición del estado de carga y procesamiento de resultados. A) PSOC. B) circuito de medición de la diferencia de fase. C) batería. D) circuito adyacente para optimizar las medidas a diferentes frecuencias (anexo 1).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos con las medidas realizadas en el laboratorio. Se pretende discutir la razón de las variaciones de tensión y corriente que sufre la batería pero, sobretodo, la relación que guarda la diferencia de fase en una señal senoidal con el estado de carga (SoC) de la propia batería. Tal y como se apuntaba en el capítulo 2, el objeto de estudio es la batería Maxell ML2016 de 3V.

4.1 Medidas experimentales y discusiones

4.1.1 Introducción

La finalidad de los ensayos de laboratorio es la de obtener datos de tensión, corriente y desfase de una señal senoidal inyectada en la batería. Todo esto debe estudiarse tanto en el proceso de carga como en el de descarga.

En la figura 2.5 se mostraba un circuito propuesto por Maxell para cargar la batería limitando la corriente de carga. Puesto que la fuente de alimentación *PROMAX FAC-662B* viene provista de un limitador de corriente máxima, no será necesario el montaje de un circuito con regulador de tensión tal y como propone el fabricante. Para cargar la batería, la conectaremos directamente a la fuente limitando su corriente máxima de salida al valor que nos indica el dataste del fabricante [8]. Se harán ciclos de carga y descarga de la batería midiendo corriente y tensión. Estos ciclos serán interrumpidos periódicamente para tomar muestras del desfase mediante el circuito que se ha diseñado. Esto servirá para tener un amplio listado de muestras que relacionarán el estado de carga, basado en la técnica “Coulomb counting” del apartado 1.2.3, con una diferencia de fase determinada. Como ya se ha apuntado, la diferencia de fase está directamente relacionada con la impedancia interna, que sufre variaciones a raíz de su estado de carga (SoC).

El proceso de medida es el siguiente: comenzamos a cargar la batería desde un SoC = 0% hasta que esté plenamente cargada. Durante este proceso, monitorizamos continuamente, mediante polímetros, la intensidad de carga y la tensión en los bornes de la batería. Se detendrá el proceso de carga cada 30 minutos aproximadamente para conectar la batería al circuito de medida y registrar el desfase que sufre la señal en ese momento. Si cargamos la batería con una intensidad de 2mA, el proceso de carga superará las 12 horas de duración así que con una muestra cada 30 minutos es más que suficiente. Durante el proceso de descarga hay que realizar los mismos pasos, aunque es un proceso mucho más rápido debido a que la intensidad de descarga se regula mediante una resistencia.

Se realizarán una gráficas con las medidas anotadas. Las gráficas más relevantes son: la evolución de la tensión en circuito abierto (V_{oc}) en función del SoC y el desfase sufrido en función del estado de carga (SoC). Precisamente, son las

medidas de la diferencia de fase las que se introducen en el sistema Controlador PSOC para determinar de manera experimental el estado de carga de esa misma batería.

Hay que tener en cuenta la corriente consumida por el circuito de medida cuando le conectamos la batería. Este valor es de vital importancia ya que habrá que corregir los cálculos del estado de carga; es un consumo que no se recoge en las gráficas del proceso de carga.

4.1.2 Corriente de carga y descarga para determinar el SoC

Como se ha comentado en el apartado anterior, las gráficas de este capítulo se harán en función del estado de carga (SoC). En el apartado 1.2.3 que hacía referencia a la técnica "Coulomb Counting", se apuntaba que el método para conocer el estado de carga era mediante la integración de la Intensidad que entraba o salía de la batería en un tiempo determinado partido entre la capacidad nominal de la batería; la fórmula 1.4 de ese mismo apartado así lo indica. Puesto que las medidas de tensión y fase están relacionadas con el SoC, a modo de ejemplo se mostrará la gráfica de intensidad de descarga de la batería en función del tiempo de donde se extraerá el estado de carga (SoC) en el proceso de descarga.

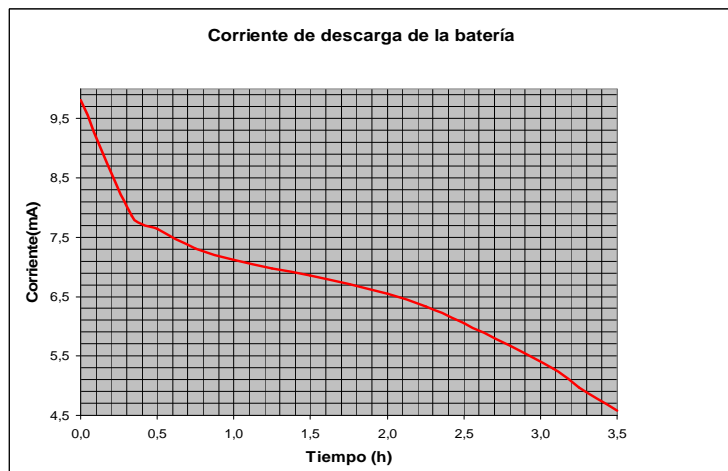


Figura 4. 1 Descarga de la batería con una $R=330 \Omega$. Sin conectar al circuito de medida.

Obtenemos la capacidad que ha perdido la batería en un instante determinado conociendo el área de la gráfica de la figura 4.1 hasta ese punto de t . Si dividimos entre la capacidad nominal conoceremos el DOD. Para conocer el estado de carga (SoC) en el proceso de descarga aplicamos la fórmula 1.3 ($SoC = 1-DOD$).

En los procesos de carga y de descarga se desconecta la batería del cargador, o de la resistencia en el caso de la descarga, para conectarla al circuito de medida. Cada vez que se procede a medir la diferencia de fase, la batería pierde parte de su carga debido al consumo del circuito. Por lo tanto, el cálculo del SoC no será

real ya que el tiempo de carga es mayor debido a esta pérdida. En la descarga, simplemente hay que tener en cuenta ese consumo como parte de la intensidad de descarga.

El cálculo de SoC en el proceso de carga se hace exactamente igual que en el de descarga, hay que conocer el área y dividirla por la capacidad nominal. La diferencia está en que el resultado es el SoC directamente.

4.1.3 Tensiones de carga y descarga vs. Tensión en circuito abierto

Como se comentaba en el capítulo 1, la tensión en circuito abierto (V_{oc}) es de suma importancia a la hora de determinar el estado de carga de una batería. Por esa razón, se va a comparar con las medidas de tensión tomadas en los procesos de carga y descarga.

Las medidas de V_{oc} deben hacerse cuando la batería haya tenido un tiempo de reposo suficiente. Para que esta medida sea lo más exacta posible, la batería debe encontrarse en equilibrio químico, o lo que es lo mismo, con los iones en reposo. Las medidas de V_{oc} se han tomado 10 minutos después de desconectar la batería del circuito de medida. Para asegurar que la medida sea exacta, se debería dejar reposar más tiempo (30 minutos, por ejemplo), pero no es posible debido a que se tendría que invertir demasiado tiempo.

La figura 4.2 muestra la gráfica obtenida a partir de la aproximación de las medidas de la tensión en circuito abierto. Se puede observar un comportamiento creciente para el estado de carga.

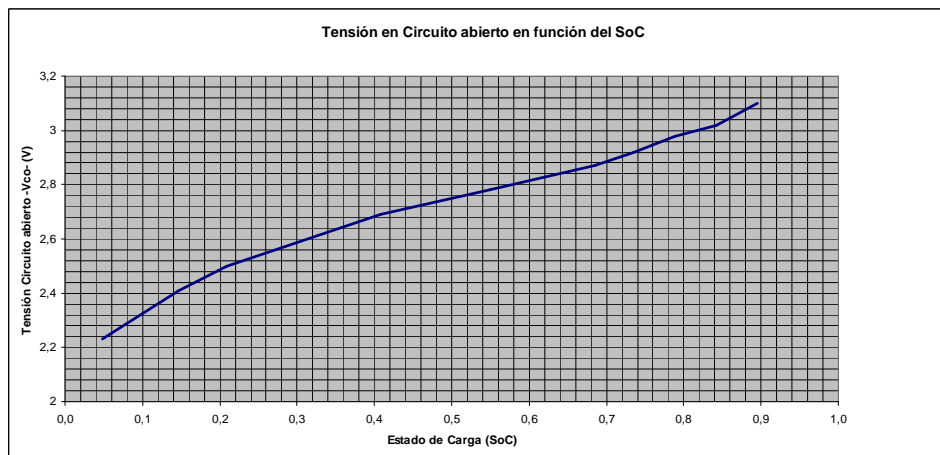


Figura 4. 2 Evolución de la tensión en circuito abierto.

Para comprender las diferencias existentes entre tensión en circuito abierto y tensión al desconectar la batería del circuito de medida, la figura 4.4 muestra la comparación entre ambas. En la figura 4.3 se muestran las medidas de tensión en durante el proceso de carga y los valores en los bornes de la batería justo en el momento en que se desconecta del circuito para medir el desfase. Por tanto, el

proceso es el siguiente: se desconecta la batería de la fuente de alimentación para conectarla en el circuito de medida. Una vez que se ha medido la diferencia de fase, se desconecta del circuito y se anota su valor de tensión (tensión de desconexión). Dejamos reposar la batería 10 minutos y anotamos su valor, que será el valor en circuito abierto (V_{oc}).

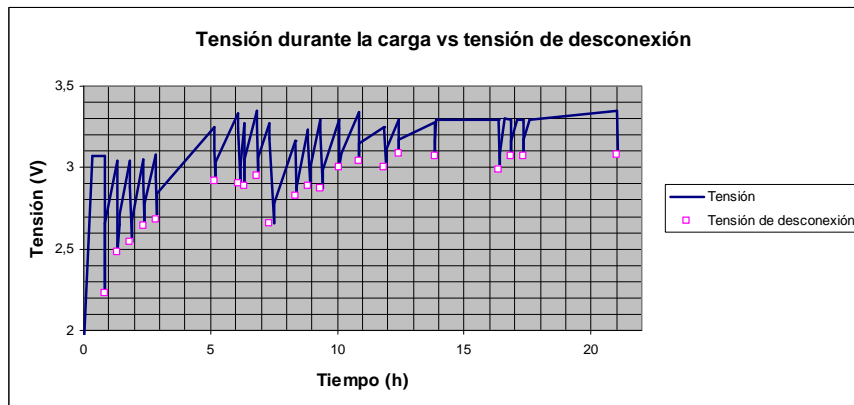


Figura 4. 3 Tensiones en el proceso de carga. Los cuadrados indican los niveles de tensión en la desconexión del circuito.

En la figura 4.3, cada uno de los puntos de tensión de desconexión corresponde a los instantes en que se comprueba el desfase mediante el circuito de medida. Puede comprobarse que cada vez que se interrumpe su proceso de carga para medir, ésta tiene que recuperar la carga perdida por lo que el tiempo de carga aumenta más de lo que debiera. 10 minutos después de tomar la medida de la tensión de desconexión se mide la tensión en circuito abierto.

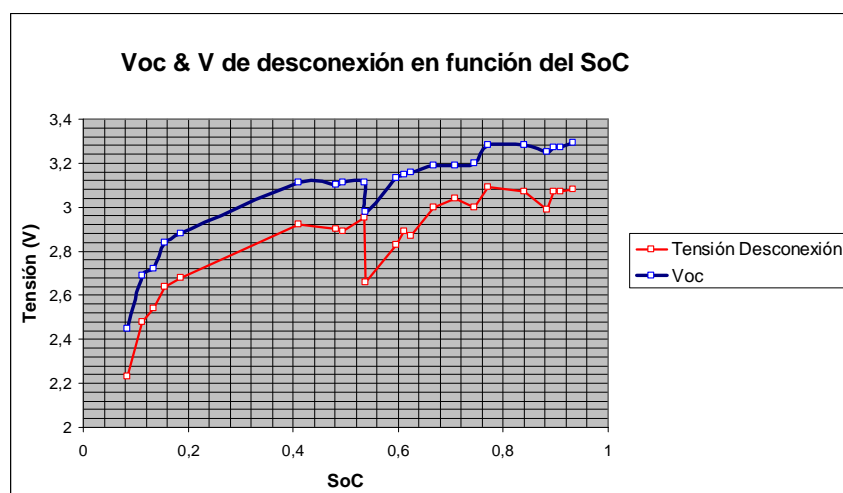


Figura 4. 4 Comparativa de la tensión en la batería al desconectarla del circuito y tensión en circuito abierto en función del SoC.

La gráfica de la figura 4.4 muestra que, durante el proceso de carga, la diferencia entre la tensión medida inmediatamente después de la desconexión del circuito y

la medida pasados 10 minutos es de unos 0,2 V. Esta diferencia es debida a que las cargas de la batería aún están en movimiento cuando desconectamos la batería. Hay que dejar que reposen para que las medidas sean más exactas. Este movimiento también afectará a las medidas de diferencia de fase, por lo que lo más adecuado sería dejar reposar la batería justo antes de cada medida con el circuito. Básicamente, eso no es posible por tema de tiempo ya que la carga de la batería se realiza a unos 2 mA y su capacidad es de 25 mAh. Si se cuenta con los descansos para que se estabilicen las cargas y la pérdida de carga cada vez que se conecta la batería al circuito, se necesitarían más de 24 horas para realizar las medidas.

4.1.4 Consumo del circuito de medida del SoC

La batería es la encargada de alimentar el amplificador de corriente del circuito de medida del SoC (figura 3.2). La intensidad necesaria para amplificar la corriente de la señal senoidal la entrega la batería, por lo que cada vez que realizamos una medida de diferencia de fase estamos descargándola. Para que las medidas del estado de carga no estén adulteradas, hay que corregir esta deriva. Como ya se ha comentado, durante el proceso de carga está pérdida significa que el tiempo aumente dando como resultado un estado de carga máximo superior al 100% (figura 4.5). La fuente de alimentación está limitada a 2 mA, por lo que no puede compensar la pérdida aportando más corriente. En cambio, en el proceso de descarga simplemente hay que añadir esta pérdida como una intensidad de descarga más, es decir, cuando conectemos la batería al circuito anotaremos la corriente consumida como corriente de descarga.

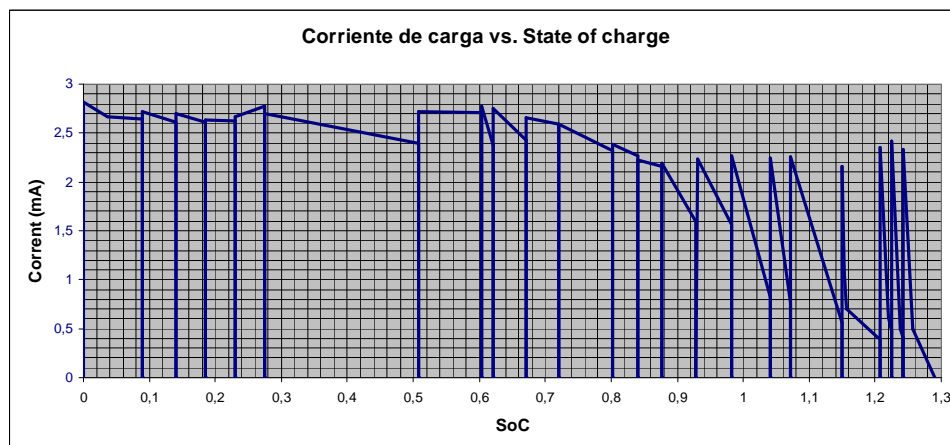


Figura 4. 5 Ejemplo del problema que supone el consumo del circuito. El estado de carga llega hasta un 130%.

Como puede comprobarse en la figura 4.5, si no se tiene en cuenta la pérdida de carga, repercute en que el cálculo del estado de carga sea erróneo ya que el tiempo de carga excede del que debiera ser.

Para que los cálculos sean correctos, el consumo debe ser parte de los datos obtenidos y verse reflejado en los cálculos del SoC. La figura siguiente muestra este consumo superpuesto a la intensidad de carga.

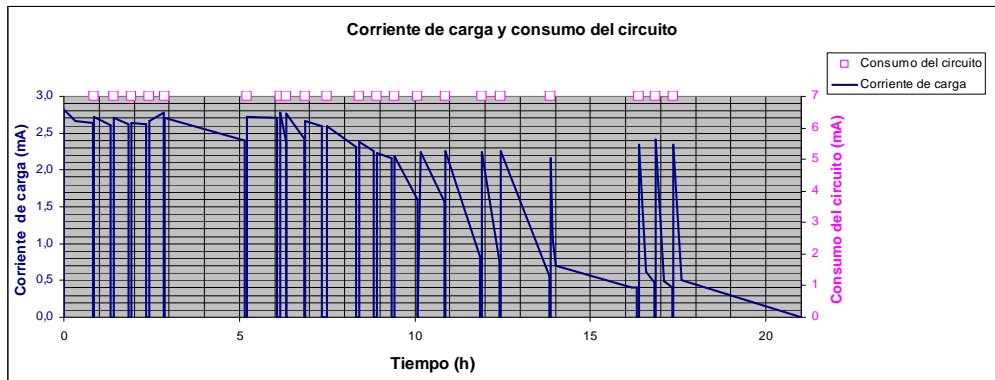


Figura 4. 6 Corriente que aporta la batería al circuito de medida (eje derecho) y corriente de carga (eje izquierdo).

En la figura 4.6, el eje de la izquierda corresponde a la intensidad de carga en función del tiempo. El eje Y de la derecha corresponde a la medida de la intensidad que entrega la batería al circuito amplificador de corriente. Como la onda senoidal que se está amplificando no varía su amplitud, el consumo de la bomba de corriente siempre es el mismo, 7 mA en este caso. Las medidas de diferencia de fase se realizan con 3 señales diferentes (1, 10 y 100Hz). Actualmente, en este prototipo, el tiempo necesario para realizar las medidas de forma manual puede ascender a 30 segundos.

Para que las medidas de diferencia de fase sean correctas, hay que conocer el SoC real en cada uno de los instantes de medida. No es necesario conocer todo el rango de SoC, simplemente corrigiendo el SoC erróneo en el momento de las medidas ya se podrá trazar una gráfica que se ajuste a la realidad.

Para corregir esta deriva en el cálculo del SoC, es necesario saber cuánto tiempo se tarda en realizar cada una de las 21 medidas (figura 4.6). Una vez sabido ese tiempo, hay que calcular la capacidad de pérdida (mAh) que tiene cada periodo de medida, integrando su intensidad en ese tiempo. Entonces, para corregir el SoC en los tiempos de medida, hay que restarle a la capacidad de la batería en ese instante (área hasta ese punto) la capacidad perdida por las medidas que se han realizado hasta llegar a ese punto. Así, tendremos la capacidad real de la batería en ese preciso momento. Para conocer el SoC, únicamente hay que dividirlo entre la capacidad nominal. Para facilitararlo, enumeraremos los instantes de medida como 1, 2, 3, ...,21. De está explicación se puede deducir la siguiente fórmula:

$$C_{real_n} = C_n - (Cp_1 + Cp_2 + \dots + Cp_n)$$

donde

$$Cp_n = 7mA \cdot (t_{2_n} - t_{1_n})$$

$$SoC_{real_n} = \frac{C_{real_n}}{C_{no\ min\ al}}$$
(4.1)

En la fórmula 4.1, C_p se refiere a la capacidad perdida en cada medida. Se calcula integrando esa intensidad en el tiempo, es decir, calculando el área de pérdida. Así que, como es un rectángulo, el área es base por altura, es decir, el tiempo invertido en realizar la medida (t_2-t_1) por el consumo (7 mA). C_{real} es la capacidad real al finalizar la medida, cuando el circuito ha dejado de consumir, en el instante t_2 . Es por eso que C_{p_n} se incluye en la fórmula, porque al finalizar la medida ya se han consumido los 7 mA. Entonces, C se refiere a la capacidad calculada en primer lugar, la errónea.

La tabla 4.1 muestra las capacidades erróneas y reales en cada uno de los instantes de medida de la figura 4.6. Para simplificar la tabla, no se pondrán las 21 medidas.

Tabla 4. 1 Relación entre capacidades erróneas y reales en el proceso de carga.

| $n \rightarrow$ | 1 | 5 | 10 | 15 | 20 | TOTAL |
|-----------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| C (mAh) | 2,239 | 6,864 | 17,990 | 24,543 | 30,622 | 32,258 |
| SoC | 0,090 | 0,275 | 0,720 | 0,982 | 1,225 | 1,290 |
| C_{real}(mAh) | 2,122 | 4,648 | 13,440 | 17,718 | 22,397 | 23,333 |
| SoC_{real} | 0,085 | 0,186 | 0,538 | 0,709 | 0,896 | 0,933 |

Según los cálculos realizados, la capacidad real se ajusta a la nominal y el Soc no sobrepasa el 100%. Ahora ya se pueden relacionar las medidas de diferencia de fase con los estados de carga que les corresponde.

4.1.5 Diferencia de fase de la onda senoidal

Ya se conoce como varía la corriente y la tensión en los procesos de carga y descarga de la batería. Esos estudios han servido para poder definir el rango del estado de carga para esa batería y así poder relacionar las variaciones de fase con un SoC determinado.

El objetivo final de este proyecto es conocer los efectos que causa la impedancia interna de la batería en una onda senoidal midiendo el desfase que sufre entre su entrada y su salida.

Como ya se ha apuntado a lo largo de este trabajo, las medidas se han realizado con señales senoidales de 1, 10 y 100Hz. Las más relevantes son las realizadas a 1Hz y 10Hz. En la figura 4.7 se mostrarán las señales reales, medidas con el osciloscopio, de la onda senoidal de 10 Hz sin sufrir el desfase y desfasada a causa de la impedancia de la batería, en los instantes de $SoC=100\%$ y $SoC=0\%$.

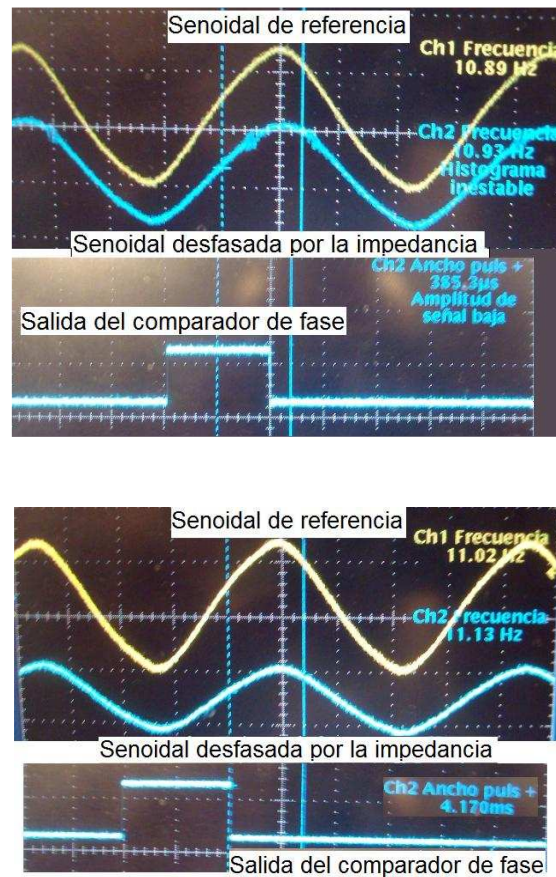


Figura 4. 7 Señales medidas con el osciloscopio correspondiente a un SoC del 100 % (arriba), y 10 % (abajo). Corresponden a la onda senoidal de 10 Hz antes y después de sufrir el desfase causado por la impedancia. Se muestra, también, la salida del comparador de fase. Se ha variado la escala de tiempo en la medida de la salida del comparador para poder apreciar el tiempo de pulso.

Se realizan medidas como las de la figura 4.7 en diferentes instantes de tiempo. A partir de esas medidas se confeccionan las gráficas que relacionan la diferencia de fase con el SoC. Puede comprobarse en la figura 4.7 como la diferencia de fase es mayor cuanto menor es su estado de carga. Si se calculan los grados de desfase en ambas gráficas mediante una sencilla regla de tres, se puede comprobar como en el caso de la batería cargada (arriba) es de -1.5° y con la batería descargada es de -16.5° (abajo), por lo que se ajusta a los resultados mostrados en la gráfica de la figura 4.9.

A modo de ejemplo, se mostrará una gráfica a continuación con los resultados de diferencia de fase de la señal de 10 Hz. Podrá comprobarse que, en la figura 4.8, no se ha aplicado la corrección del apartado anterior. Esto es debido a que no es posible corregir los resultados de medida de intensidad pero nos sirve para mostrar la variación de fase en los 21 puntos de la gráfica.

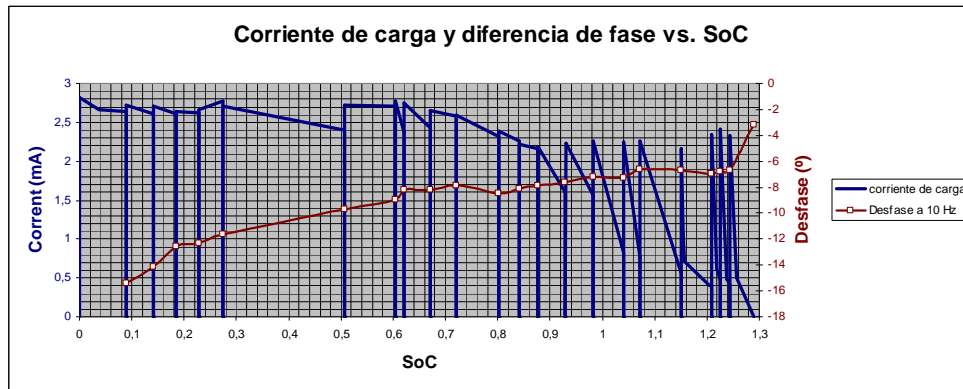


Figura 4. 8 Desfase que sufre la senoidal (eje derecho) para una señal de 10 Hz. El signo negativo indica que la salida está retrasada respecto a la entrada de la batería.

Si se aplican los cálculos de la fórmula 4.1 del apartado anterior, se podrá comprobar que los valores de diferencia de fase se ajustan a los estados de carga reales. A partir de los resultados obtenidos en la tabla 4.1, se puede extraer la relación entre el desfase que sufre una señal senoidal de 10 Hz en el proceso de carga y el estado de carga de la batería. La figura 4.9 muestra esa relación.

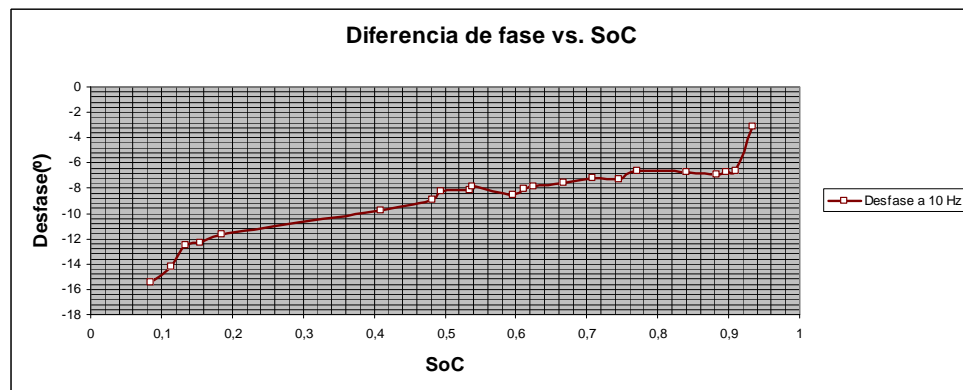


Figura 4. 9 Variación de la fase de la señal senoidal de 10 Hz respecto el SoC durante la carga.

Cada vez que se conecta la batería al circuito de medida se realizan 3 medidas, una por cada una de las frecuencias. En el anexo 1 se detalla cómo es posible alternar entre 3 señales diferentes sin manipular el circuito. El proceso consiste en inyectar la señal de 1 Hz, por ejemplo, y mirar el desfase que sufre, anotarlo y conmutar a la de 10 Hz. Una vez anotado el desfase que sufre una senoidal de 10 Hz, se conmuta a la de 100 Hz. El resultado de estas medidas se muestra en la figura 4.10, tanto en la carga como en la descarga.

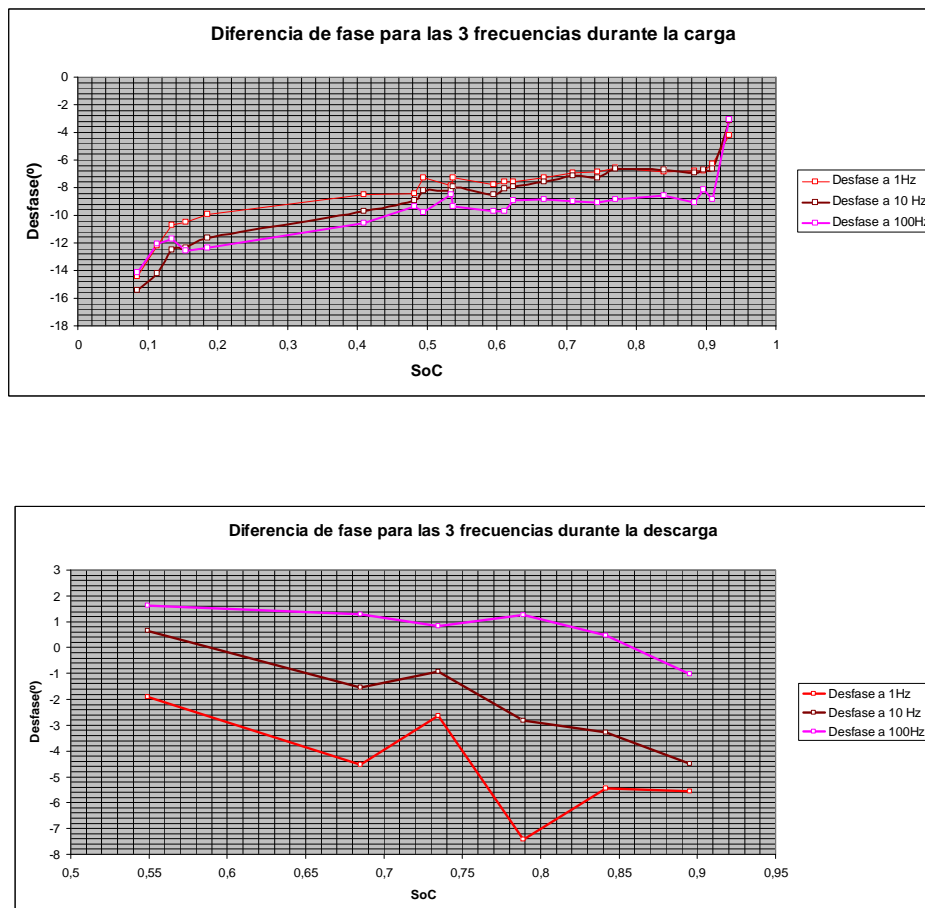


Figura 4. 10 Variaciones de fase para las 3 frecuencias en sus procesos de carga y de descarga.

Durante el proceso de carga (figura 4.10 –arriba-), las variaciones de fase de las tres frecuencias presentan muy pocas diferencias entre ellas. Podría decirse que tienen un comportamiento casi idéntico variando, únicamente, sus valores y manteniendo la tendencia. Este comportamiento se atribuye a la respuesta en frecuencia que tendría en base al circuito equivalente de la figura 1.12. No hay que olvidar que las baterías están diseñadas para trabajar como fuentes de DC pero, en AC, se comportan como un circuito capacitivo, así que las variaciones del ángulo de fase variarán en función de ese circuito equivalente.

Durante la carga, la diferencia de fase varía desde los 16° hasta los 3°. Es una diferencia bastante amplia pero, si se observa la figura 4.10 (arriba), se puede apreciar como mantiene una progresión muy constante hasta el 90%. Otros estudios realizados sobre esta misma batería reportan resultados semejantes a los que muestra la figura 4.10 (arriba) [6]. Los resultados no serán idénticos aunque el modelo de batería sea el mismo. Esto se debe a la química de la celda y a que el comportamiento de cada elemento es diferente para cada batería.

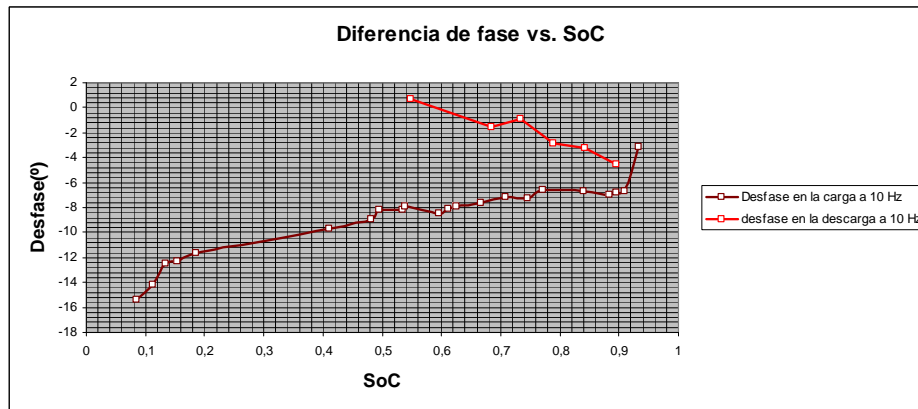


Figura 4. 11 Comparativa del desfase, para una señal de 10 Hz, del proceso de carga y de descarga.

El circuito de medida diseñado se alimenta con la propia batería así que, durante el proceso de descarga, la pérdida de carga impide que, a partir de un momento determinado, el circuito funcione correctamente. Al no funcionar correctamente la bomba de corriente, la onda en el colector del transistor se deforma y las medidas de diferencia de fase no son fiables. Este es el motivo por el que la diferencia de fase durante la descarga de la figura 4.11 (abajo) sólo indica medidas hasta el 50 %. De todos modos, se puede comentar que la tendencia es a la inversa que en el proceso de carga. Mientras que durante la carga la diferencia de fase tiende a disminuir contra mayor es el SoC, en el proceso de descarga ocurre todo lo contrario y la tendencia es claramente ascendente, aumenta el desfase contra mayor es el estado de carga, llegando incluso a tener valores de fase positivos, es decir, que la señal de salida de la batería estaría adelantada respecto a la de entrada. Esto es debido a que la impedancia interna no sólo es capacitiva, sino que también tiene parte inductiva durante la descarga.

Hay poca diferencia entre las 3 frecuencias de medida durante la descarga. Igual que durante la carga, la tendencia de las 3 es parecida, aunque la de 100 Hz parece que se diferencia un poco al tener una respuesta más llana.

4.1.6 Propuestas de mejora del circuito

Para una mayor optimización de los recursos, se podría alimentar todo el circuito con la misma batería que se estudia. Esto permitiría implementar el sistema en cualquier dispositivo móvil ya que no sería necesaria una fuente externa para alimentar el resto de integrados. Habría que tener en cuenta que la alimentación pasaría de ser de 5 V a 3 V y que el consumo no fuera excesivo para que el circuito no influya demasiado en la propia medida.

En cuanto a las medidas, es preferible esperar a que las cargas de la batería se estabilicen antes de conectar la batería al circuito de medida. Esto permitirá que las medidas de corriente y tensión en circuito abierto sean más veraces. La medida de la diferencia de fase también sería más estable ya que con los iones en movimiento no se obtenía un ancho de pulso fijo, y en una misma medida podía haber variaciones constantes de algunos microsegundos.

Hay un excesivo consumo como consecuencia de variar la frecuencia de la señal de referencia de forma manual. Una posible mejora del circuito sería que el microcontrolador variase la frecuencia de la señal senoidal y así reducir considerablemente el tiempo invertido en realizar las medidas de diferencia de fase.

4.2 Procesamiento de resultados mediante PSOC

Después de realizar todas las medidas y ensayos necesarios en el laboratorio, hay que implementar el sistema diseñado para mostrar los resultados del estado de carga de la batería. El microcontrolador PSOC procesará los resultados obtenidos a partir de las gráficas del apartado anterior.

Todos los resultados de diferencia de fase respecto al SoC deben ser introducidos en el programa. Como ya se ha explicado en el apartado 3.2.5 donde se hablaba del bloque controlador, el software va a leer la diferencia de fase entregada por el comparador de fase y la va a comparar con los valores de desfase pertenecientes a la figura 4.10. Cuando encuentre el valor exacto o, en su defecto, el más cercano, mostrará por la pantalla LCD el estado de carga (SoC) en el que se encuentra la batería.

En capítulos anteriores ya se apuntó que estas medidas sólo son válidas para esta batería, ni siquiera para otra del mismo modelo. La razón es que, aunque sean del mismo fabricante y tengan las mismas características, la química de 2 baterías siempre es diferente. Para poder utilizar el programa de PSOC en otro tipo de batería, habría que crear un nuevo perfil realizando todas las medidas necesarias e introducir las en el código del programa, por no hablar que habría que recalcular los componentes de gran parte del circuito, sobretodo del amplificador de corriente.

En la figura 4.12 se observa el resultado que mostraría la pantalla LCD de PSOC midiendo el estado de carga de la batería con una señal inyectada de 10 Hz. Se incluye una barra gráfica que equivale al porcentaje que puede leerse



Figura 4. 12 Display LCD mostrando el SoC y la frecuencia de 'señal'.

CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto ha sido el de diseñar un sistema capaz de determinar el estado de carga de una batería en función de las variaciones de fase que sufre una señal alterna a causa de su impedancia interna. Como se comentó en la introducción, se pretendía emular el funcionamiento de un analizador de impedancias, inyectando en la batería una señal senoidal a diferentes frecuencias y estudiando las variaciones que sufre su fase. Este objetivo se ha cumplido con creces ya que el circuito es capaz de generar una señal, inyectarla y detectar una variación en su fase. Además, se ha dado un salto cualitativo con respecto al analizador de impedancias porque no sólo mide el desfase, sino que también determina, mediante un microprocesador, qué estado de carga tiene la batería en el momento de la medida.

La propuesta inicial del circuito se ha ido modificando en función de las necesidades experimentales. El primero de los cambios fue cuando se pretendía transformar la señal cuadrada de la salida del VCO en una señal senoidal. El componente principal del filtro es el amplificador operacional y, para que funcione correctamente, tiene que ser del tipo rail-to-rail, ya que se pretendía que a la salida entregase valores de tensión idénticos a las tensiones de alimentación. Los operacionales que se probaron recortaban la señal en el semiciclo negativo. Se hicieron varias pruebas con offsets, con diodos zéner, sumadores pero ninguno entregaba el resultado deseado. Al final se optó por colocar un operacional rail-to-rail, que entregaba una senoidal muy limpia.

Debido a las características de la batería, se ha tenido que gestionar los tiempos de carga muy meticulosamente. Las baterías ML2016 no permiten cargas rápidas, por lo que el proceso de carga era, como mínimo, de 12 horas (sin medidas de fase). Esto ha repercutido en los resultados ya que las medidas tenían que hacerse en 2 ó 3 días. Estos largos descansos entre medida y medida hacían que las cargas se estabilizasen, cosa que en principio es beneficiosa, aunque el resto de medidas no gozaban de ese descanso y, por lo tanto, las medidas no han sido equitativas.

Como se ha podido comprobar, las baterías son un elemento eléctrico bastante complicado. Su comportamiento depende de muchos factores, ya sean de la química de la propia batería como de factores externos. De todas maneras, se ha conseguido diseñar un sistema sencillo, pequeño, barato y fácil de implementar que dependiendo de un factor intrínseco de la batería. Únicamente habría que sustituir el microcontrolador de PSOC por algún otro tipo de microprocesador mucho más pequeño y que se pudiera integrar en un circuito impreso.

Este proyecto instiga a continuar investigando sobre los procesos químicos de las baterías y a mejorar los sistemas de determinación del estado de carga (SoC). Queda pendiente un sistema que sea capaz de estimar la duración de la batería en función de su estado de salud (SoH).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wikipedia, La enciclopedia libre. "Batería (electricidad)".
Web/URLs: <http://es.wikipedia.org>
- [2] Wikipedia, La enciclopedia libre. "Puerta Lógica".
Web/URLs: <http://es.wikipedia.org>
- [3] Romera A., Cuadras A. "Sistema de medida de la càrrega de bateries".
Treball Fi de Carrera. 2010
- [4] Berndt, D., "Electrochemical Energy Storage", Cap. 1 en *Battery Technology Handbook*, Kiehne, H. A., Marcel Dekker Inc., New York, (2003)
Web/URLs: <http://books.google.es/>
- [5] HowStuffWorks. "How Lithium-ion Batteries Work".
Web/URLs: <http://www.howstuffworks.com/>
- [6] Cuadras A., Kanoun O. "SoC Li-ion Battery Monitoring with Impedance Spectroscopy", *Proceedings of the 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, Djerba (Tunisia), pp: 991-995 (2009)
- [7] Cuadras A., Tröltzsch U., Kanoun O. "Low Energy Budget Battery Monitoring"
- [8] Maxell DataSheet. "ML2016"
Web/URLs : <http://es.farnell.com>
- [9] E-Battery
Web/URLs: <http://www.ebattery.com.au/>
- [10] Dufo López R. "*Dimensionado y control óptimos sistemas híbridos aplicando algoritmos evolutivos*". Tesis Doctoral 2007
- [11] Electropaedia. "Battery and Energy Technologies. Glossary"
Web/URLs: <http://www.mpoweruk.com/glossary.htm>
- [12] Davide Andrea. "Battery Management Systems for Large Lithium Battery Packs".
Library of Congress Cataloging-In-Publication Data
- [13] Peña Ordóñez C. "Estudio de baterías para vehículos eléctricos".
Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid
- [14] Mastervolt. "Masterlink BTM-III Users Manual".
Web/URLs: <http://www.mastervolt.com/>
- [15] Arnau Vives A., Ferrero y De Loma Osorio J.M., Jiménez Jiménez Y., Sogorb Devesa T. "Sistemas Electrónicos de Comunicaciones II". *Capítulo 9. Bucles de enganche de fase (PLLs)*. Universidad Politécnica de Valencia.

- [16] Krohn-Hite. "Krohn Hite Corporation Model 6620A". *Specifications*.
Web/URLs: <http://www.krohn-hite.com>
- [17] Tektronix. *Características y especificaciones serie TDS 3000C*.
Web/URLs: <http://www2.tek.com>
- [18] Wikipedia, La enciclopedia libre. "Filtro de Sallen-key".
Web/URLs: <http://es.wikipedia.org/>
- [19] PsoC Developer. *PsoC Developer Forums*.
Web/URLs: <http://www.psocdeveloper.com/forums/>
- [20] CYPRESS PERFORM
Web/URLs: <http://www.cypress.com/>
- [21] Phillips. "Datasheet HEF4046B MSI Phase-locked loop".
January 1995.
- [22] Dirección técnica de RTVE. "Manual de mantenimiento de UU.MM de RNE".
Radio Nacional de España en Cataluña.
- [23] Carlson, A. Bruce. "Teoría de Circuitos", Thomson, Madrid, (2004)
- [24] Angulo C., Muñoz A., Pareja J. "Prácticas de electrónica. Semiconductores Básicos: diodo y transistor"
McGrawHill. 1989.
- [25] Cuadras A. "Método y aparato de medida del estado de carga y del estado de salud de las baterías".
Solicitud de patente de invención. Universitat Politècnica de Catalunya.

ANEXOS

Anexo 1. Circuito para optimizar las medidas a diferentes frecuencias.

Para inyectar las diferentes senoidales en la batería (1, 10 y 100 Hz), es necesario cambiar los valores de los componentes en el VCO y en el filtro Sallen-key. Como existe el problema del consumo del circuito, las medidas se han de hacer en el menor tiempo posible. Así que no es óptimo tener que cambiar físicamente las resistencias y variar el potenciómetro del VCO cada vez que se quiere alternar entre las diferentes frecuencias. Para solventar el problema, se ha diseñado un circuito en una placa de baquelita basado en conmutadores. Consiste en 3 conmutadores de 4 vías, uno para cada frecuencia. Cada vez que se activa un conmutador, el VCO y el filtro varían su frecuencia de trabajo de tal modo que si, por ejemplo, se activa el conmutador para 10 Hz, el VCO oscilará a 10 Hz y el filtro tendrá una f_c también de 10 Hz, por lo que entregará una senoidal a esa frecuencia. Los únicos valores fijos son los de las resistencias para determinar la f_c del filtro ya que es imprescindible poder ajustar la frecuencia porque el PLL no es estable al 100 %, así que para variar la frecuencia del VCO se usan resistencias variables. Sólo puede haber 1 conmutador activado. La siguiente figura muestra las variaciones que sufre el esquema de la figura 3.2 para incorporar este circuito.

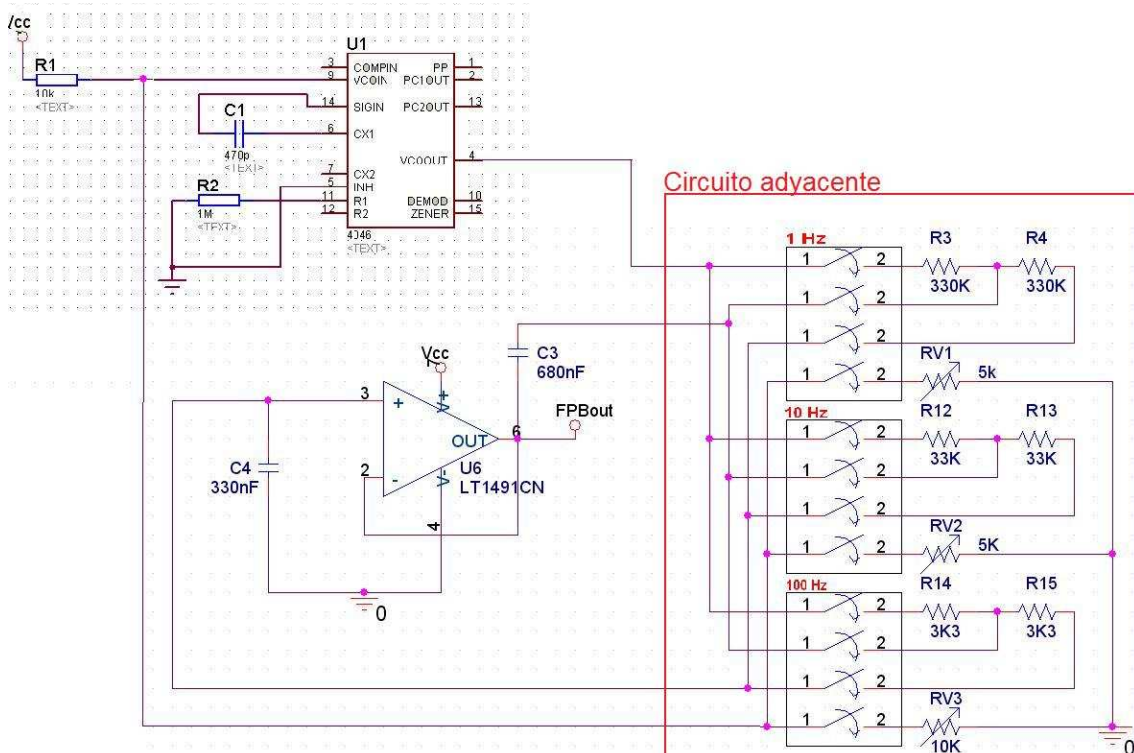


Figura A. 1 Esquema teórico del circuito adjacente para la optimización de las medidas de diferencia de fase. A partir de la salida FPBout, continúa el circuito explicado en el proyecto.

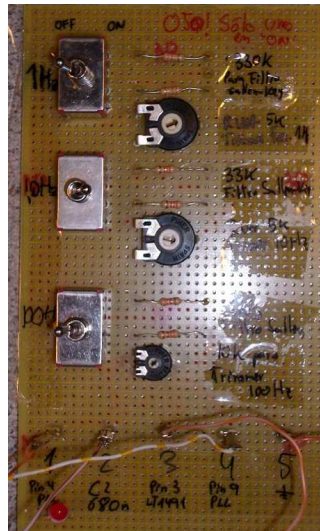


Figura A. 2 Circuito real montado en la baquelita. Tiene 5 pines de In/Out para conectarlo al circuito de medida del SoC.

Anexo 2. Código del programa de procesamiento de resultados.

```
#include <m8c.h> // part specific constants and macros
#include "PSoCAPI.h" // PSoC API definitions for all User Modules
#include <stdio.h> //librerías de C utilizadas
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define DATA_AVAILABLE 0x01 //Constantes
#define FALLING_EDGE 0x02

//declaración de variables
WORD CapturePosEdge_signal,CapturePosEdge_lag;
WORD CaptureNegEdge_signal,CaptureNegEdge_lag;

WORD PulseWidth_signal,PulseWidth_lag; //variables donde guardamos los anchos de pulso

BYTE Flags_signal,Flags_lag;

#define buffer 9 //variable que indica la cantidad de posiciones de los vectores de datos que
introduciremos (medidas de laboratorio)

//declaración de vectores y carga de datos

float data1_lag[buffer] = {10.750,9.904,8.488,7.317,7.291,7.821,7.284,6.839,4.189}; //vectores
para 1Hz (grados de desfase y porcentaje de carga SoC
int data1_soc[buffer] = {13,18,41,49,54,60,67,84,93};

float data10_lag[buffer] = {12.527,11.640,9.713,8.202,7.901,8.480,7.593,6.707,3.149};
//vectores para 10Hz (grados de desfase y porcentaje de carga SoC)
int data10_soc[buffer] = {13,18,41,49,54,60,67,84,93};
```



```
float data100_lag[buffer] = {11.7, 12.348, 10.548, 9.792, 9.36, 9.72, 8.892, 8.568, 3.096}; //vectores
para 100Hz (grados de desfase y porcentaje de carga SoC)
int data100_soc[buffer] = {13, 18, 41, 49, 54, 60, 67, 84, 93};
```

```
//Cuando hay que ejecutar funciones que se salen de lo que C entiende. Salta a funciones
#pragma interrupt_handler Timer_signalCaptureISR
#pragma interrupt_handler Timer_lagCaptureISR
```

```
int j,i,find, pos, barra;
float freq, phase, res_delay;
char SoC_str[4]; //array para mostrar por pantalla el "State of Charge".
char error[16] = "Error de Frec.";
char freq_str[4];
int SoC_int;
```

```
void find_soc (float phase_lag, float data_lag[], int data_soc[]) //función que se llama en cada
rango sde frecuencias
```

```
{
    //recorremos el vector correspondiente a cada frecuencia y encontramos el valor de
    //desfase que más se aproxima. El LCD mostrará su SoC
    i=0;
    j=0;
    find=0;
    res_delay=0;
    pos=-1;
    while ((i<buffer)&&(find==0))
    {
        if (fabs(data_lag[i]-phase_lag)== 0)
        {
            //hace esto cuando encuentra en el vector el número exacto de
            //grados (muy poco probable);
            find=1; //damos este valor para salirnos del while, ya ke ya ha
            //encontrado el valor exacto
            pos=i;
        }
        else
        {
            if (res_delay==0)
            {
                res_delay=fabs(data_lag[i]-phase_lag);
                //lo hace la primera vez
                pos=i;
            }
            else
            {
                if (res_delay>fabs(data_lag[i]-phase_lag))
                //buscamos el valor de "phase" más próximo
                {
                    res_delay=fabs(data_lag[i]-phase_lag);
                    pos=i;
                }
            }
            i++;
        }
    }
}
```

```

    SoC_int=data_soc[pos];
    //guardamos el porcentaje de carga en un integer para después pasarlo a string

    itoa(SoC_str,SoC_int,10);
    // Convertir a string el integer del array de State of Charge
    //Se guarda en la cadena SoC_str[

    barra=SoC_int*80/100; //Barra Gráfica de porcentaje de carga.regla de 3
    LCD_Position(0,0); //colocar "el puntero" en file 0 y col. 0 del LCD
    LCD_PrCString("          "); //limpiar LCD

    LCD_InitBG(LCD_SOLID_BG); //inicializar la barra grafica

    LCD_DrawBG(0,0,16,barra); //dibujar barra grafica de % de SoC.

    // Imprimir StateofCharge en el LCD y la frecuencia de la señal inyectada:

    LCD_Position(1,0);
    LCD_PrCString("          ");
    LCD_Position(1,0);
    LCD_PrCString("SoC=");
    LCD_Position(1,4);
    LCD_PrString(SoC_str); //State of Charge
    LCD_Position(1,7);
    LCD_PrCString("%");
    LCD_Position(1,9);
    LCD_PrCString("F=");
    LCD_Position(1,11);
    LCD_PrString(freq_str); //frecuencia de la señal test
    LCD_Position(1,14);
    LCD_PrCString("Hz");

}

void main()
{
    // Enable Global Interrupt
    M8C_EnableGInt;

    // Limpiar flags
    Flags_signal = 0;
    Flags_lag = 0;

    // Inicializar Timers y habilitar interrupciones
    Timer_signal_Start();
    Timer_signal_EnableInt();
    Timer_lag_Start();
    Timer_lag_EnableInt();

    // Start LCD y PWM. El PWM genera una señal test. Sólo se usa para simular,
    evidentemente, nuestras señales son externas.
    PWM_Start();
    PWM1_Start();
    LCD_Start();

```

```

while(1) //bucle infinito que imprime continuamente en display. Si las señales varían, imprime
los nuevos resultados
{

```

```

// Comprueba si los datos de pulsewidth están disponibles
if(Flags_signal & Flags_lag & DATA_AVAILABLE)
{
    freq=10000/(PulseWidth_signal*2);
    // calculamos la frecuencia a partir del ancho de pulso de la señal.
    PulseWidth hay que multiplicarlo por exp.-4 (clock del timer es 10KHz)

    itoa(freq_str,freq,10); //pasar la frecuencia a texto para sacarla por LCD
    phase=PulseWidth_lag*180/PulseWidth_signal;
    //calculamos, con una regla de 3, los grados de desfase que equivale al
    ancho de PulseWidth_lag.
    //Pulsewidth_lag= ancho de pulso de la salida del comparador de fase.
    //PulseWidth_signal=ancho de pulso de la señal inyectada en batería

    //inicializamos las variables dentro del bucle infinito para que
    continuamente muestre el resultado en display, ya que los anchos de
    pulso pueden variar

    if ((0.9<freq)&&(freq<1.5))
    //rango aceptado para una señal inyectada de 1Hz
    {

        find_soc(phase,data1_lag,data1_soc);
        //llamamos a la función find_soc pasándole los datos phase y
        los vectores de datos de esa frecuencia

    }
    else if ((9.5<freq)&&(freq<10.5))
    //rango aceptado para una señal inyectada de 10Hz
    {

        find_soc(phase,data10_lag,data10_soc);

    }
    else if ((98<freq)&&(freq<103))
    //rango aceptado para una señal inyectada de 100Hz
    {

        find_soc(phase,data100_lag,data100_soc);

    }
    else
    {
        //si no es ninguna de las 3 frecuencias, mostrar un mensaje de error

        LCD_Position(0,0);
        LCD_PrCString(" "); //limpiar LCD
    }
}

```

```

        LCD_InitBG(LCD_SOLID_BG);
        //inicializar la barra grafica

        //dibujar barra decorativa
        LCD_DrawBG(0,0,16,20);
        //dibujar barra grafica decorativa
        LCD_DrawBG(0,12,16,80);

        // Imprimir "error de freq." en el LCD

        LCD_Position(0,4);
        //Escribir la frecuencia de signal para ver que es
        //errónea (entre las 2 barras dibujadas antes)
        LCD_PrCString("F= ");
        LCD_Position(0,7);
        LCD_PrString(freq_str);
        LCD_Position(0,10);
        LCD_PrCString("Hz");

        LCD_Position(1,0);
        LCD_PrCString("      ");

        LCD_Position(1,0);
        LCD_PrString(error);
        //Mostrar en el LCD el mensaje: "Error de Frec."
        Guardado en la cadena error[]

    }

    Flags_signal &= ~DATA_AVAILABLE;
    Flags_lag &= ~DATA_AVAILABLE;

}

}

}

//Code example para leer el tiempo de un pulso en PSOC:
void Timer_signalCaptureISR(void)
{
    if(Flags_signal & FALLING_EDGE)
    {
        // Read the count on negative edge
        CaptureNegEdge_signal = Timer_signal_wReadCompareValue();

        // Change the capture to positive edge and clear the FALLING_EDGE flag
        Timer_signal_FUNC_LSB_REG &= ~0x80;
        Flags_signal &= ~FALLING_EDGE;

        // Calculate the pulswidth by finding difference between positive edge
        // and negative edge counts. As both the numbers are unsigned numbers
        // the result will be correct even if there is an underflow in the counter
        // The result will be accurate as long as the total pulswidth is less than
        // 65535 timer ticks.
        PulseWidth_signal = CapturePosEdge_signal - CaptureNegEdge_signal;
    }
}

```

```
// Set the Data available flag
Flags_signal |= DATA_AVAILABLE;
}
else
{
    // Read the count on positive edge
    CapturePosEdge_signal = Timer_signal_wReadCompareValue();

    // Change the capture to negative edge and set flag
    Timer_signal_FUNC_LSB_REG |= 0x80;
    Flags_signal |= FALLING_EDGE;
}
}

void Timer_lagCaptureISR(void)
{
    if(Flags_lag & FALLING_EDGE)
    {
        // Read the count on negative edge
        CaptureNegEdge_lag = Timer_lag_wReadCompareValue();

        // Change the capture to positive edge and clear the FALLING_EDGE flag
        Timer_lag_FUNC_LSB_REG &= ~0x80;
        Flags_lag &= ~FALLING_EDGE;

        // Calculate the pulswidth by finding difference between positive edge
        // and negative edge counts. As both the numbers are unsigned numbers
        // the result will be correct even if there is an underflow in the counter
        // The result will be accurate as long as the total pulswidth is less than
        // 65535 timer ticks.
        PulseWidth_lag = CapturePosEdge_lag - CaptureNegEdge_lag;

        // Set the Data available flag
        Flags_lag |= DATA_AVAILABLE;
    }
    else
    {
        // Read the count on positive edge
        CapturePosEdge_lag = Timer_lag_wReadCompareValue();

        // Change the capture to negative edge and set flag
        Timer_lag_FUNC_LSB_REG |= 0x80;
        Flags_lag |= FALLING_EDGE;
    }
}
```