



**Mondragon
Unibertsitatea**

Faculty of
Engineering

3. Estimación de estado de salud

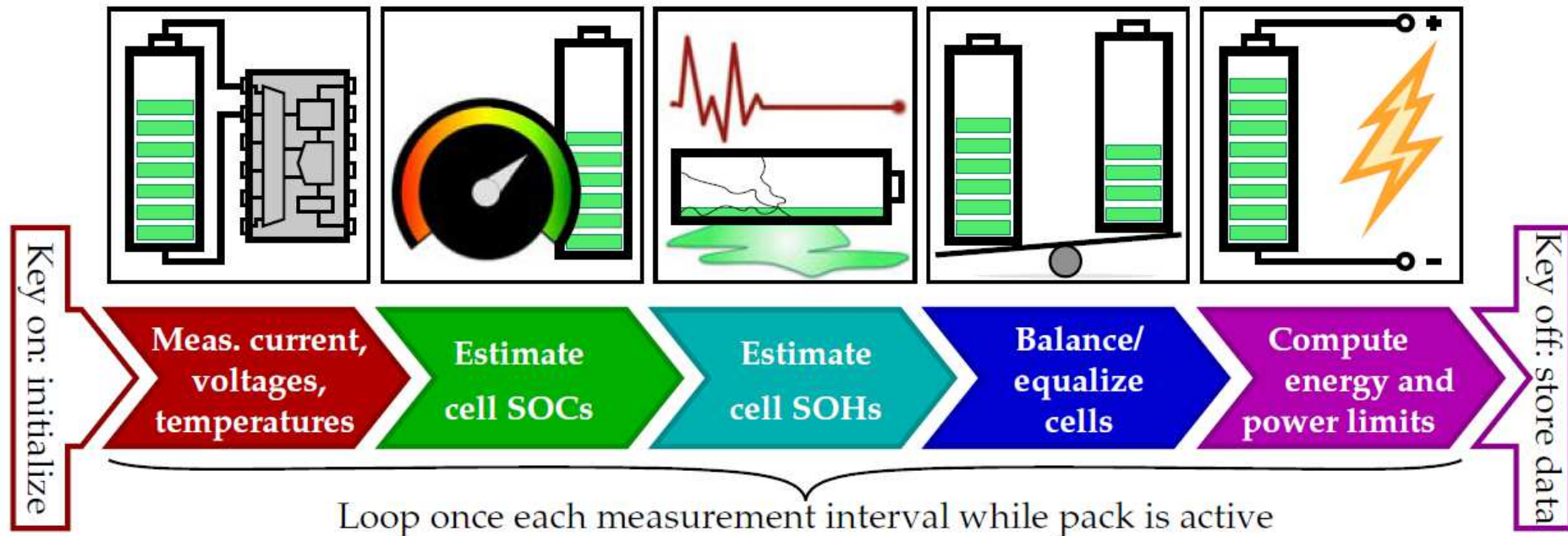
Máster en Sistemas Inteligentes de Energía

Unai Iraola - Laura Oca

1

Estimación de estados de batería

Algoritmo principal de un BMS



G. Plett, Battery Management Systems. Vol. 2. Equivalent-circuit methods

- Estimación del SoC.
- Estimación del SoH. (Diagnóstico)
- Ecuilización de celdas o balanceo.
- Computar límites de energía y potencia. (SoE and SoP)
- Otros estados en bibliografía SoS

2

Estado de salud (SoH)

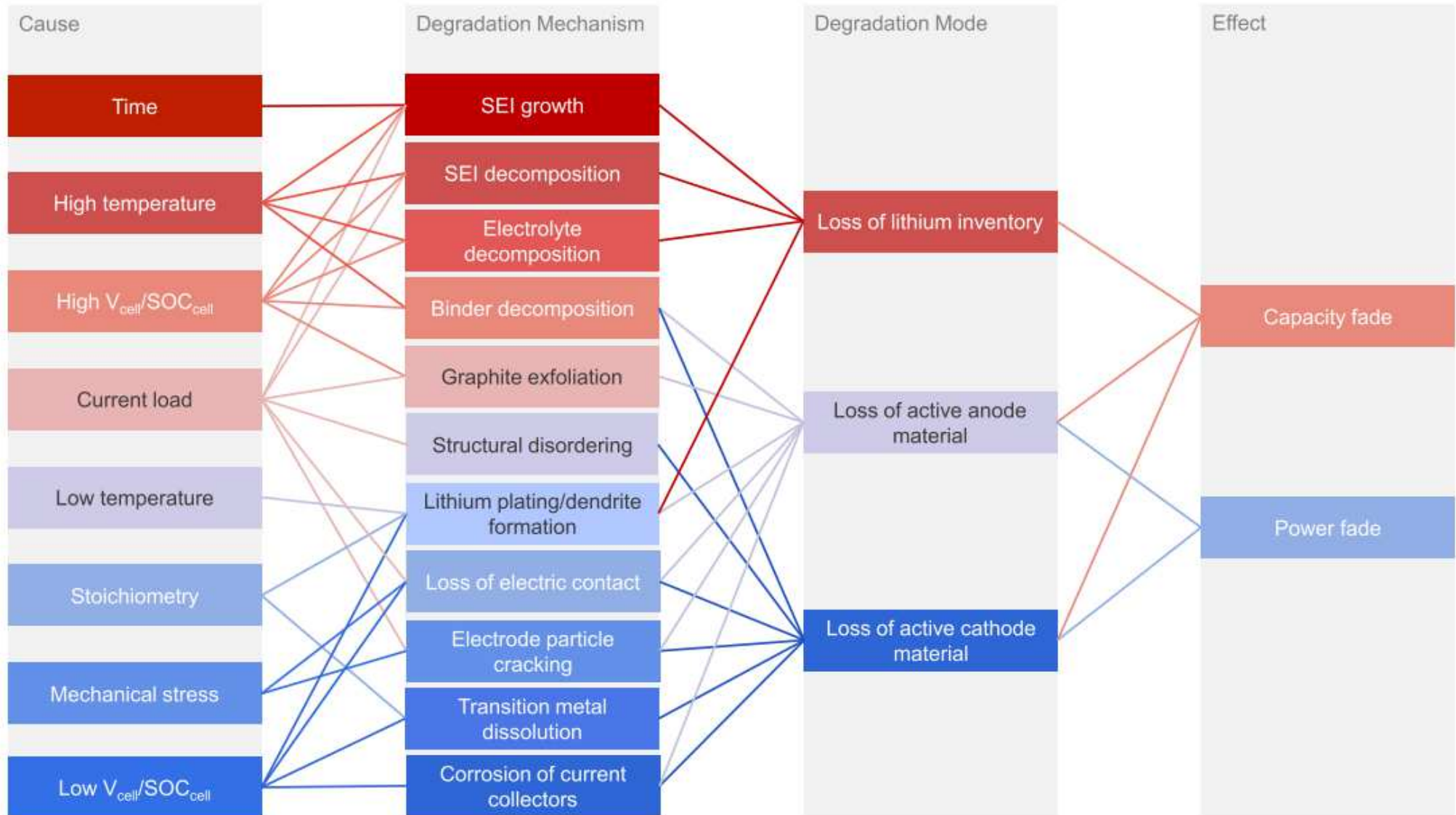
¿Por qué es necesario estimar el SoH?

- A medida que vamos utilizando un BP, las celdas van a degradarse irremediablemente.
- **Es necesario determinar en qué estado de salud están ya que esto va a afectar en las estimaciones de SoC y en los límites de potencia y energía que tenemos en nuestras celdas.**
- Normalmente, el SoH se define como un valor entre 100% (al inicio de la vida de la batería) hasta su EOL (End of life) una vez que esa batería no es capaz de alimentar correctamente su aplicación.
- En aplicaciones de vehículo eléctrico este valor suele ser el 80% aunque en otro tipo de aplicaciones va en función de poder o no poder cumplir con los requerimientos de la aplicación.
- Sin embargo, el concepto de “second life” ha traído consigo un cambio en el que una vez que la batería llega a su EOL puedes continuar utilizándola en otra aplicación menos exigente, ya que las celdas todavía funcionan de manera correcta.
- Necesitamos entender qué parámetros varían en nuestros modelos y cómo modificarlos a medida que las baterías van envejeciéndose, para poder adaptar nuestros algoritmos del BMS.

¿Por qué es necesario estimar el SoH?

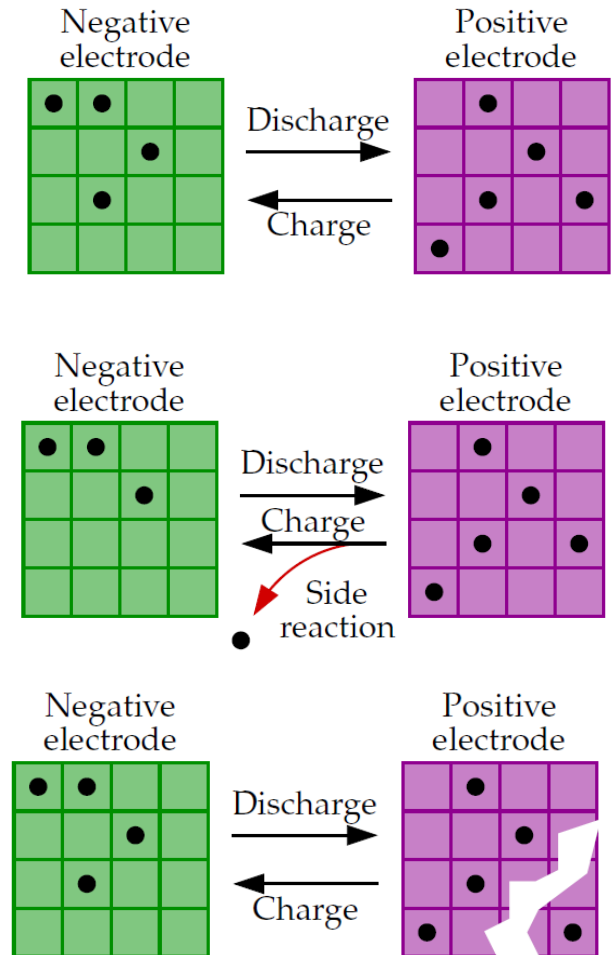
- Tener en cuenta dos cosas:
 - Hay veces que las celdas tienen impurezas o errores que suceden durante la fase de fabricación.
 - Hay factores externos que pueden afectar a la batería sobre los que no tenemos control, por ejemplo, cuando el BMS está apagado.
- No tenemos manera de tener en cuenta este tipo de problemas, es un tema a resolver, pero podemos hacer cosas para minimizar el riesgo.
- Lo que vamos a ver aquí son formas de estimar el SoH cuando no haya eventos o fallos repentinos.
- En el capítulo de SoC, los parámetros del modelo ECM varían relativamente rápido, a medida que cambian la temperatura y SoC, sin embargo, hablando de SoH, los parámetros del modelo cambiarán más despacio, el envejecimiento tiene una dinámica más lenta.
- Por lo tanto, aquí nos centraremos en indicadores que hagan que el comportamiento de nuestras celdas cambie. (Pérdidas de capacidad o de energía disponible, reducción de la capacidad de dar potencia)
- Normalmente, se estiman la capacidad total de las celdas y el incremento de la resistencia interna de las mismas como indicadores de degradación.

Mecanismos, factores de estrés y consecuencias



Capacidad total de la celda (simplificación)

- Este término depende del litio disponible en la reacción química y de los huecos disponibles en los electrodos para que el litio se intercale.
- A medida que la celda se degrada, la **reacción colateral** (*Normalmente se da en carga*) que sucede hace que el litio se pierda y ese litio ya no se pueda utilizar en la propia reacción. (*Figura en medio*)
- Además, a medida que la celda se utiliza también puede haber **cracks** que hagan que haya menos huecos en nuestros electrodos.
- La capacidad total vendrá dada por el valor mínimo entre los huecos del electrodo positivo, los huecos del electrodo negativo y los iones de litio.
- A medida que estos fenómenos suceden vamos perdiendo huecos y iones que hacen que tengamos una caída en capacidad o un fenómeno de “capacity fade” en nuestra celda.
- El algoritmo tiene que estimar este valor, el Kalman del SoC sólo podrá corregir pequeños errores en este término.



G. Plett, Battery Management Systems. Vol. 2.
Equivalent-circuit methods

ESR o Equivalent series resistance

- La capacidad total afecta para la estimación de SoC, ya sea con CC o con CC + Kalman y para la estimación del SoE o lo que es lo mismo los límites de energía.
- La ESR tiene un impacto grande en los límites de potencia que se pueden aplicar. Al final, si la resistencia crece, para la misma corriente circulando a través de la batería tenemos una caída de tensión mayor.
- Sin embargo, esta ESR sólo tendrá impacto en la estimación de SoC si utilizamos métodos de medida directa por tensión, ya que nuestra tensión se verá muy afectada por esta resistencia. Para el resto de los métodos vistos, CC y CC + Kalman no tendrá una influencia importante.
- *¿Por qué crece esta resistencia?*
 - Esta resistencia crece debido a las reacciones colaterales que comentábamos anteriormente, ya que se forman capas superficiales encima de las partículas del material activo que impiden el transporte de iones.
 - El deterioro estructural corta las vías electrónicas entre partículas y disminuye la conductividad electrónica.

Estimación de ESR

- La opción más típica es utilizar las medidas de tensión y corriente de la celda para realizar la estimación de ESR.
- El problema es que esta ESR tiene que ser sensible a los cambios de tensión, ya que es lo que mediremos para poder estimarla.
- La sensibilidad de ESR se define de la siguiente forma:
 - *Sensibilidad* $\frac{R_0}{v_k} = \frac{-R_0}{v_k} i_k$
 - Teniendo en cuenta que la R_0 en una batería tiene un valor de miliohmios, la tensión son unos pocos voltios y la corriente son amperios llegando incluso a valores grandes, podríamos llegar a valores alrededor de 0.01, lo cual permite estimarlo a partir de la tensión.
- (Obviando la histéresis) Lo más normal es restar dos muestras de tensión consecutivas y dividirlo por la diferencia en corriente:
 - $\widehat{R_{0,k}} = \frac{(v_k - v_{k-1})}{i_{k-1} - i_k}$
 - Sin embargo, cuando la diferencia entre las muestras de corriente consecutivas es 0 o cercana a 0 tenemos un problema de resultado infinito en nuestra estimación. (Por ejemplo, en un periodo de reposo)
 - **Es necesario no actualizar $R_{0,k}$ cuando esto suceda.**

Estimación de ESR

- Además, cuando las diferencias entre i_{k-1} e i_k son pequeñas la estimación de ESR que se realiza no es tan fiable y se recomienda hacer la estimación cuando la diferencia de corriente entre muestras consecutivas pasa de un **umbral** que define el diseñador.
- Así, si esa diferencia no supera el valor umbral establecido **se mantendrá la muestra R0 anterior**.
- Utilizando la ecuación anterior el resultado sale bastante ruidoso dependiendo del valor umbral que se aplique, y una de las opciones para solucionar este problema de ruido es hacer un filtro digital.
 - $\hat{R}_{0,k}^{filt} = \alpha \hat{R}_{0,k-1}^{filt} + (1 - \alpha)\hat{R}_{0,k}$, where $0 \ll \alpha < 1$
 - Se obtienen resultados aceptables incluyendo un filtro de este tipo.
- Hay artículos que hablan de incluir un Kalman filter no lineal para hacer la estimación de ESR, pero siendo observable mediante la tensión y pudiendo estimarse online de manera sencilla no se considera necesario.

Estimación de capacidad total

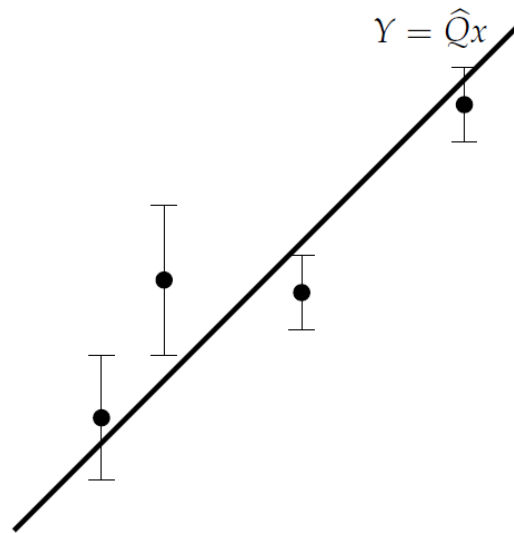
- *¿Es sensible la tensión a la pérdida de capacidad? ¿La pérdida de capacidad se ve reflejada en la tensión?*
 - La respuesta es que no, y que, por tanto, esta estimación se complica sobremanera. (Para diferencias de SoC mayores es más sensible)
 - La tensión ofrece muy poca información sobre la capacidad total.
 - Por tanto, no hay un método “simple” con el que se pueda hacer esto.
- Cuando la aplicación te lo permite puedes hacer una medida directa o un diagnóstico de tu capacidad total realizando una descarga completa de la celda o batería. Pero esto pasa muy muy pocas veces.
- Llegados a este punto, en bibliografía se proponen dos formas de realizar estas estimaciones:
 - Mediante Kalman filter (Complejo). Este método tiene la ventaja de que además de la capacidad total **se pueden actualizar los valores de los parámetros de nuestros modelos a medida que las celdas envejecen**, sin embargo, son complicados de implementar y ofrecen problemas de estabilidad.
 - Mediante técnicas de regresión (Más sencillo). La regresión es una técnica que determina cómo una variable X se relaciona con otra Y , es decir, si X crece, ¿ Y crece o decrece? Y por otro lado si los valores de una variable pueden ser utilizados para predecir la otra.

Estimación de capacidad total (Regresión)

- ¿Cómo se aplica en baterías y concretamente a la estimación de la capacidad total?
- Partimos de la ecuación del SoC del libro “*Battery Management Systems volumen 2 Equivalent-circuit methods*” de Gregory Plett.
 - $z_{k2} = z_{k1} - \frac{1}{Q} \sum_{k=k_1}^{k_2-1} \eta_k i_k$
 - En la que Q es la capacidad total.
 - Y agrupando la ecuación de esta manera:
 - $\underbrace{-\sum_{k=k_1}^{k_2-1} \eta_k i_k}_y = Q \underbrace{(z_{k2} - z_{k1})}_x$
 - En ese formato $y = Qx$ tenemos una ecuación de una recta y para resolver cuánto vale Q utilizaremos un método de **mínimos cuadrados**.
- El problema es que este método asume que x es un valor conocido y que la variable y puede tener cierta incertidumbre.
 - $(y - \Delta y) = Qx$

Estimación de capacidad total (Regresión)

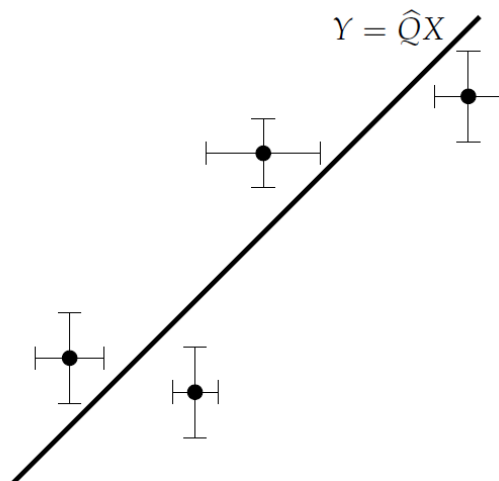
- Por tanto y si despejamos la y :
 - $y = Qx + \Delta y$
 - En la que y se refiere a una cantidad de Ah o una cantidad de carga y Δy se refiere a la incertidumbre de ese cálculo debido al ruido en la medida.
 - El algoritmo trata de estimar valores de \hat{Q} basándose en vectores de datos de (x,y) haciendo que la suma de errores cuadráticos de Δy sea el mínimo posible.
 - Siendo el error $\hat{y} - y$



G. Plett, Battery Management Systems. Vol.
2. Equivalent-circuit methods

Estimación de capacidad total (Regresión)

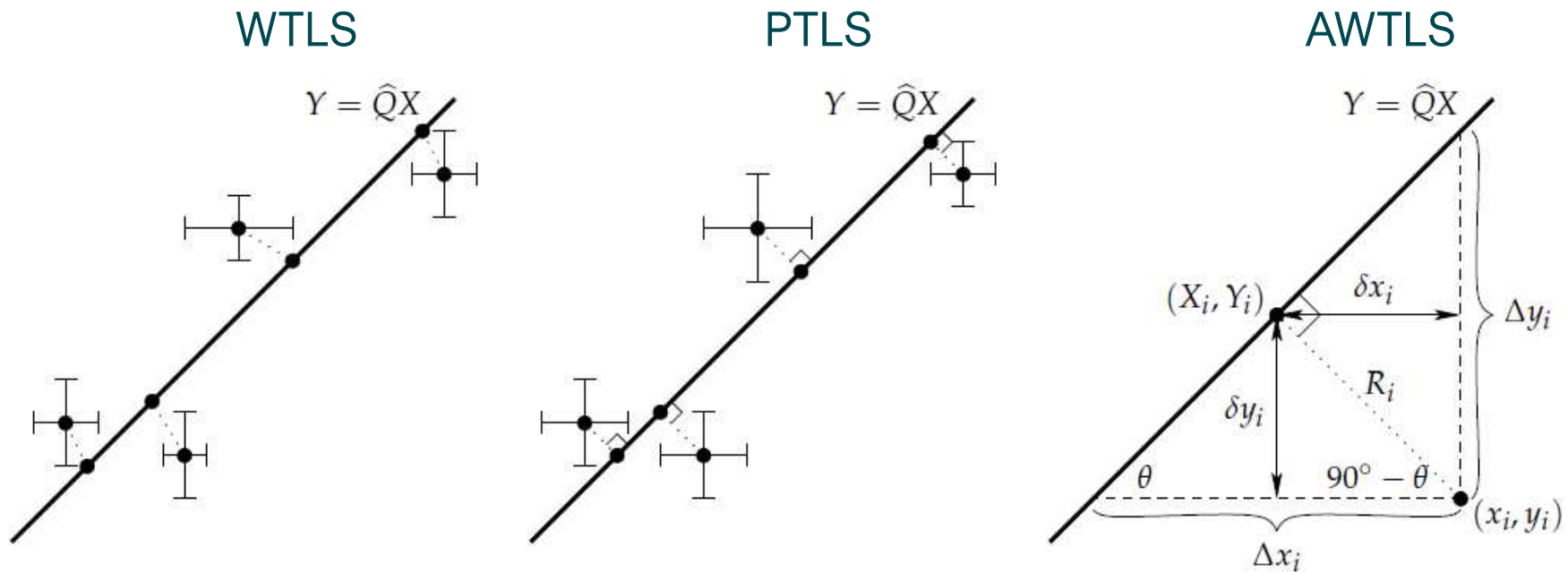
- Sin embargo, en nuestro caso x hace referencia a dos valores de SoC distintos y ya hemos visto en los estimadores de SoC que estos valores están sujetos a incertidumbre por el ruido del sensor de corriente y la propia estimación.
- Por tanto, pasamos a tener que resolver un problema más complejo que el descrito en la diapositiva anterior.
 - $(y - \Delta y) = Q(x - \Delta x)$
 - Esto no se puede resolver con una *regresión por mínimos cuadrados* y se utiliza una variante llamada *mínimos cuadrados totales* o “*total least squares regression*”



G. Plett, Battery Management Systems. Vol. 2. Equivalent-circuit methods

Estimación de capacidad total (Regresión)

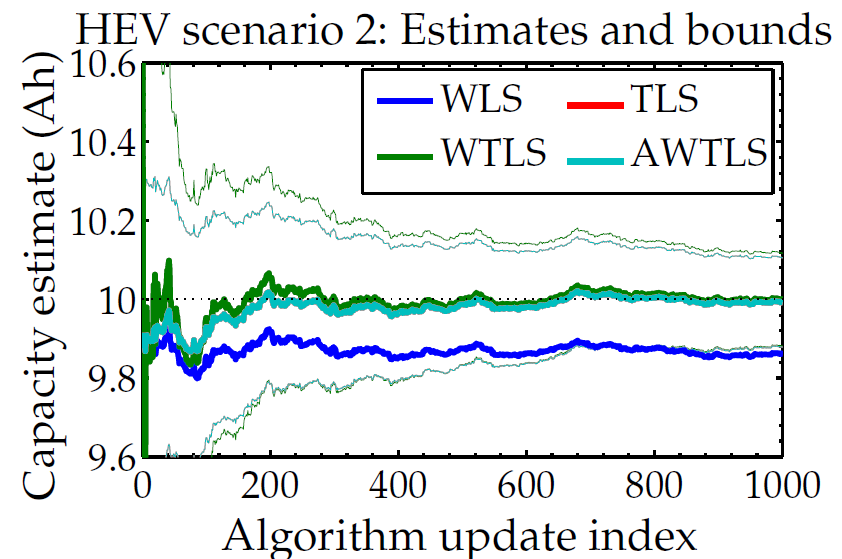
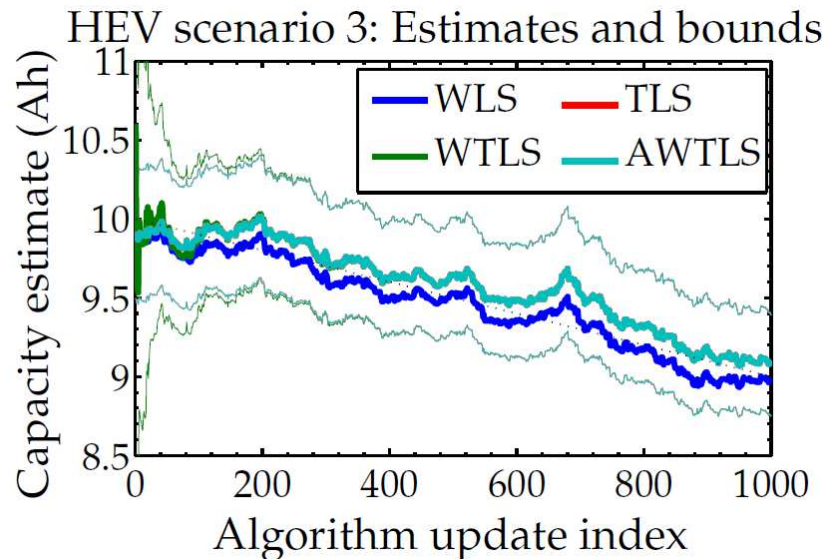
- La opción sencilla es intentar que tu estimación de SoC no tenga error y que, por tanto, Δx sea 0. Para ello, se puede hacer que antes y después de la estimación siempre haya tiempos de reposo y de esa manera casi elimines la incertidumbre en la estimación de SoC.
- Así, puedes aplicar WLS de manera ordinaria.
- Nuestro libro de referencia muestra los desarrollos de este método WLS, además de los desarrollos para WTLS, PTLs y AWTLS.



G. Plett, Battery Management Systems. Vol. 2. Equivalent-circuit methods

Estimación de capacidad total (Regresión)

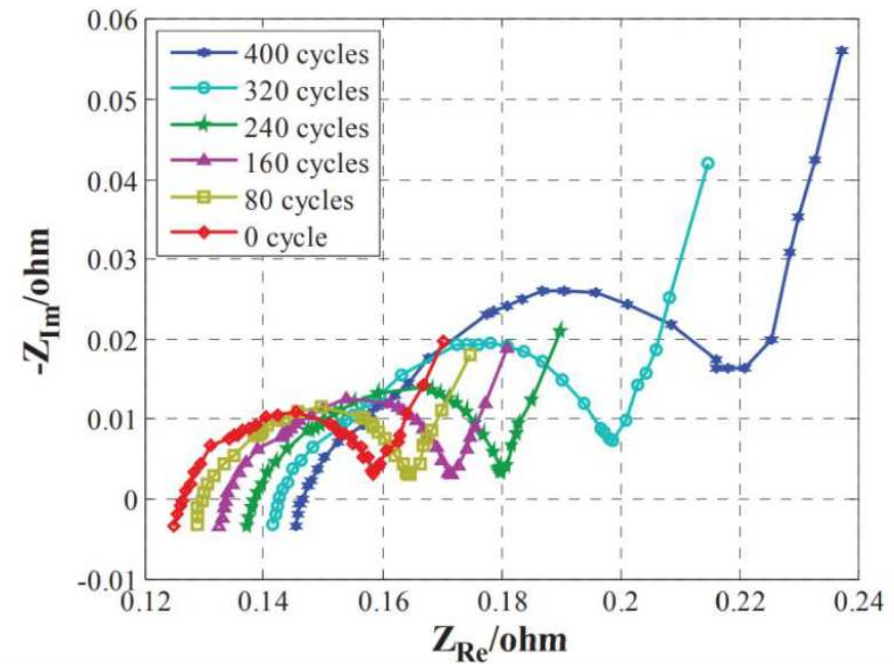
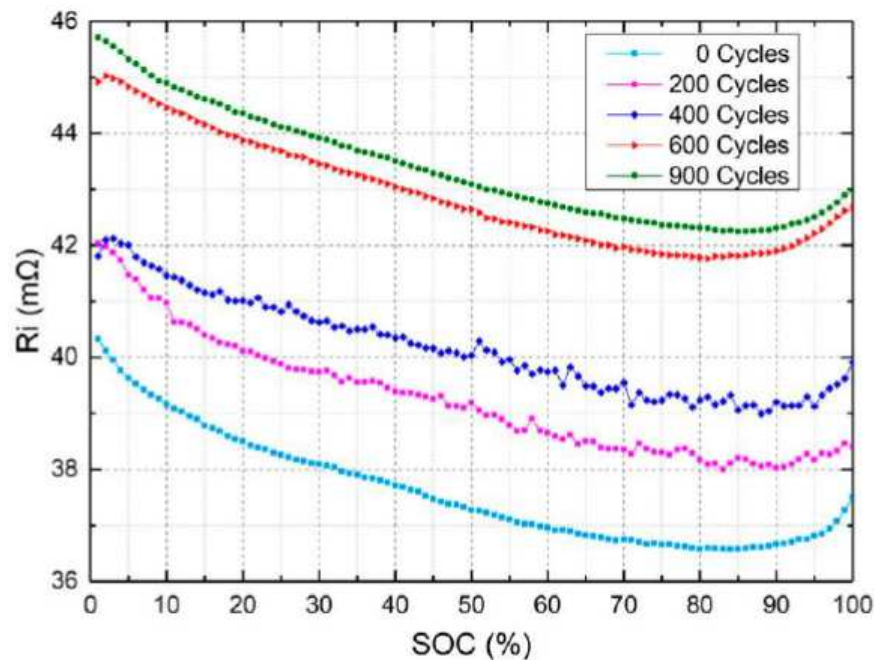
- En el libro “*Battery Management Systems volumen 2 Equivalent-circuit methods*” de Gregory Plett, entre las páginas 196-217 desarrolla todas las ecuaciones necesarias para implementar todos estos métodos, paso por paso.
- A partir de la página 217 hasta el final del capítulo explica el código en Matlab necesario para implementar estas soluciones para 6 casos de uso distintos.
- Los resultados obtenidos para la estimación de la capacidad total a través de regresión son muy buenos:



G. Plett, Battery Management Systems. Vol. 2. Equivalent-circuit methods

Otros métodos de estimación

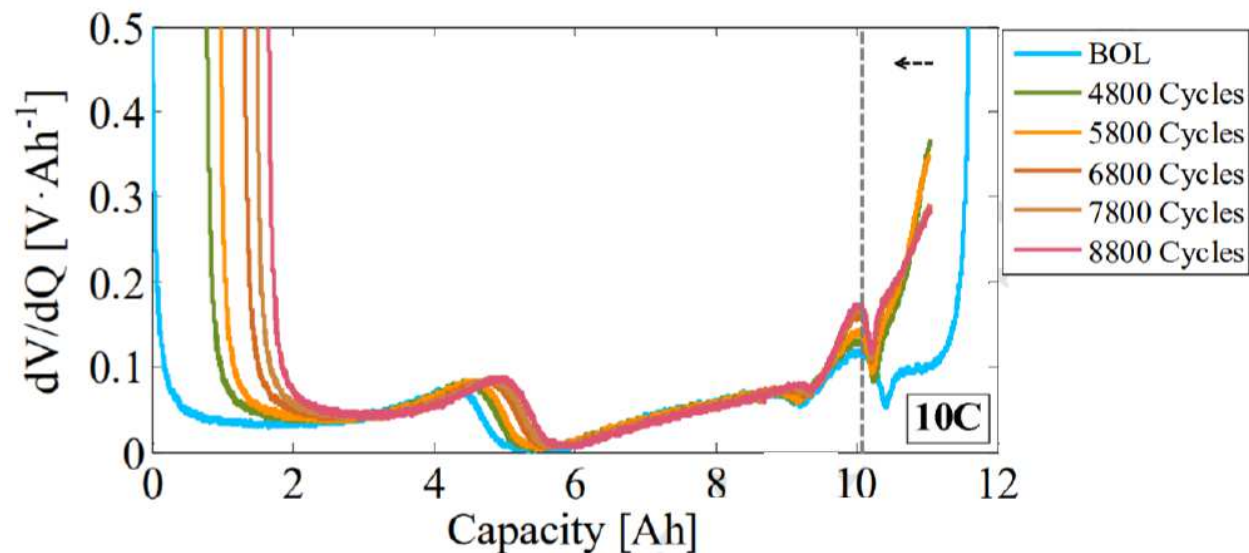
- Métodos en medida directa:
 - Ya hemos hablado de la relación entre resistencia interna y degradación.
 - También están las medidas de EIS, difícil de implementar en BMS.
 - Además, hay que tener en cuenta que otros factores como la temperatura o el SoC pueden influir en la impedancia, haciendo difícil su uso para la estimación de la degradación.



Markel Azkue, Development and validation of li-ion battery state algorithms capable of adapting to new chemistries, PhD research project proposal

Otros métodos de estimación

- Métodos de medida directa que tienen que ver con la corriente:
 - Aquí encontramos el coulomb counting, de igual manera que en el caso del SoC.
 - Se realiza una descarga completa de la batería para estimar su estado. (Normalmente no se puede hacer)
 - $SoH = \frac{Q_{total}}{Q_{total0}} \times 100$
 - Utilizar las curvas de dV/dQ para no descargar completamente la celda.



Markel Azkue, Development and validation of li-ion battery state algorithms capable of adapting to new chemistries, PhD research project proposal



**Mondragon
Unibertsitatea**

Faculty of
Engineering

Eskerrik asko
Muchas gracias
Thank you

Unai Iraola

uiraola@mondragon.edu

Laura Oca

lauraoca@mondragon.edu