



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo: "Comparación de modelos para la estimación de la vida útil de las baterías de ión de litio"

Autor

Sergio Marquino Leonar

Director

Rodolfo Dufo López
Área de Ingeniería Eléctrica

Facultad / Escuela

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA) / Universidad de Zaragoza

"Comparación de modelos para la estimación de la vida útil de las baterías de ión de litio"

RESUMEN

La estimación correcta de la vida de las baterías de ión de litio, a día de hoy, es esencial, tanto en aplicaciones estacionarias como en vehículos eléctricos, dado que el conocimiento de su envejecimiento permitirá estimar los costes del ciclo de vida correctamente, favoreciendo el desarrollo de estas tecnologías. Debido a esto, uno de los objetivos de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica de los métodos existentes para la estimación de la vida útil de las baterías de litio (en función de los ciclos de carga-descarga y de otras variables), mediante la revisión de revistas científicas y tesis doctorales relacionadas con el tema.

Se han implementado a partir de dichas fuentes los principales modelos actuales que existen para la estimación de la vida útil de las baterías, y cada uno de los cuatro modelos de estudio recopilados han sido implementados en la simulación de sistemas fotovoltaicos autónomos, haciendo uso del programa Microsoft Excel.

Posteriormente, se han estudiado diez casos diferentes de sistemas fotovoltaicos autónomos utilizando todos los modelos implementados, extrayendo conclusiones acerca de cuál se ajusta más a la realidad, y de la vida útil de las baterías estimada según el perfil de consumo soportado y sus condiciones.

Finalmente, la información obtenida ha sido utilizada para conocer la rentabilidad del almacenamiento energético en baterías de ión de litio frente a las de plomo ácido comúnmente usadas en los sistemas fotovoltaicos autónomos.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. SERGIO MARQUINO LEONAR

con nº de DNI 72.979.107-S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

GRADO, (Título del Trabajo)

"COMPARACIÓN DE MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LAS
BATERÍAS DE IÓN DE LITIO"

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 22 DE JUNIO DE 2.016

Fdo: SERGIO MARQUINO LEONAR

Tabla de contenido

LISTA DE SÍMBOLOS.....	4
INTRODUCCIÓN	5
DESARROLLO.....	6
CONSIDERACIONES GENERALES.....	6
MODELO DE ESTUDIO "A"	7
MODELO DE ESTUDIO "B"	7
MODELO DE ESTUDIO "C"	7
MODELO DE ESTUDIO "D"	8
COMPROBACIÓN DE LOS MODELOS.....	8
CASOS DE ESTUDIO	9
CASO 1. Batería Pequeña sin generador diésel auxiliar.....	9
CASO 2. Batería pequeña con generador de respaldo auxiliar.....	11
CASO 3. Batería muy grande sin generador diésel auxiliar	13
CASO 4. Batería requerida para dar cuatro días de abastecimiento sin generador diésel auxiliar	15
CASO 5. Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula.....	17
CASO 6. Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula en consumo aleatorio	18
CASO 7. Estudio de influencia de la capacidad de la batería con la instalación de un generador de 300 W y 500 W	19
CASO 8. Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula con SOC = 20%.....	24
CASO 9. Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula con generación fotovoltaica de un aerogenerador	26
CASO 10: Número de aerogeneradores a colocar para dar una tasa de energía no servida nula con una batería mediana	28
COMPARACIÓN CASOS DE ESTUDIO	30
MODELO A	31
MODELO B.....	31
MODELO C	32
CONCLUSIONES	33
BIBLIOGRAFÍA.....	33
ANEXOS.....	34
ANEXO 1: Resumen artículo "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications" (Barré, A. et al. 2013).....	34
ANEXO 2: Resumen artículo "Cycle-life model for graphite-LiFePO ₄ cells" (Wang, J, et al, 2011).....	37
ANEXO 3: Resumen artículo "On the complex ageing characteristics of high-power LiFePO ₄ /graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents" (Groot, J. et al. , 2015)	42
ANEXO 4: Resumen Tesis Doctoral "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Ageing Models" (Groot, J. 2014)....	43
ANEXO 5: COMPROBACIÓN DE MODELOS.....	47
ANEXO 6: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 1.....	54



ANEXO 7: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 2.....	56
ANEXO 8: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 3	57
ANEXO 9: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 4	60
ANEXO 10: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 5	63
ANEXO 11: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 8.....	66
ANEXO 12: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 9.....	69
ANEXO 13: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 10	72
ANEXO 14: RESULTADOS COMPARACIÓN CASOS DE ESTUDIO	75

LISTA DE SÍMBOLOS

BOL	Beginning of life
EOL	End of life
SOH	State of Health
SOC	State of Charge
SEI	Solid Electrode Interphase
DOD	Depth of Discharge

INTRODUCCIÓN

El principal propósito de este trabajo es la estimación de la vida útil de las baterías de litio, con el fin último de evaluar en el apartado técnico y económico si sería viable la sustitución de las ampliamente usadas baterías de plomo, en numerosas aplicaciones de la vida diaria, por otras de ión de litio. El estudio se va a centrar en aplicaciones fotovoltaicas autónomas (aisladas de la red), ver Figura 1.

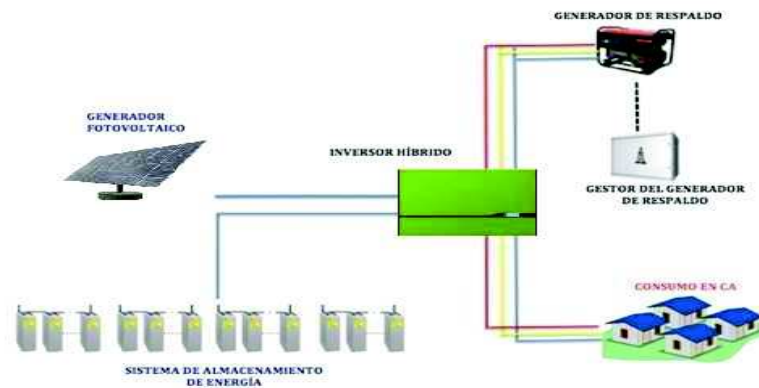


Figura 1. Sistema fotovoltaico autónomo (con posibilidad de generador de respaldo). Fuente: <http://www.degeriberica.com/>

Para ello, se ha recopilado información de diversas fuentes, las cuales son tres artículos de la revista científica *Journal of Power Sources* – (Barré, A. et al, 2013), (Wang, J. et al, 2011) y (Groot, J. et al, 2015)- y una Tesis Doctoral de Chalmers University of Technology of Sweeden – (Groot, J. 2014)-.

Mediante el programa Microsoft Excel se han implementado los diferentes modelos que se plantean en (Wang, J. et al, 2013) y (Groot, J et al, 2015), así como en la tesis doctoral (Groot, J. 2014). El artículo (Barré, A. et al, 2013) sirve de apoyo teórico a las otras publicaciones.

Posteriormente, se ha evaluado cada caso de estudio de sistemas fotovoltaicos autónomos mediante los cuatro modelos implementados. Dichos casos de estudio son:

- Caso 1: Batería pequeña sin generador diésel auxiliar
- Caso 2: Batería pequeña con generador diésel auxiliar
- Caso 3: Batería muy grande sin generador diésel auxiliar
- Caso 4: Batería requerida para dar cuatro días de abastecimiento sin generador diésel auxiliar
- Caso 5: Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula
- Caso 6: Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula con consumo aleatorio
- Caso 7: Estudio influencia de la capacidad de la batería con la instalación de un generador gasolina de 300 W y 500 W
- Caso 8: Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula con SOC = 20%
- Caso 9: Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula con generación fotovoltaica de un aerogenerador
- Caso 10: Número de aerogeneradores a colocar para dar una tasa de energía no servida nula con una batería mediana

DESARROLLO

CONSIDERACIONES GENERALES

Para el estudio de los diferentes casos de estudio planteados a continuación se dispone de unos datos horarios de un año completo de consumo eléctrico típicos de una vivienda con aparatos de bajo consumo y sin climatización ni cocina eléctrica. También se dispone de datos horarios de producción eléctrica de un generador fotovoltaico de 2,4 kWp localizado en el entorno de Zaragoza capital, con inclinación de 60° y orientación sur. Todos los datos horarios de partida se han obtenido mediante el software iHOGA.

En primer lugar, se han implementado los modelos estudiados en las revistas científicas y la tesis doctoral, para posteriormente realizar el estudio de los diferentes casos. Los diferentes modelos son:

- Modelo "A": Extraído de (Wang, J. et al, 2011)
- Modelo "B": Extraído de (Groot, J. 2014)
- Modelo "C": Extraído de (Groot, J. 2014)
- Modelo "D": Extraído de (Groot, J. et al, 2015)

Las baterías usadas en este trabajo están compuestas de celdas de 3 V y 2.32 Ah. Por lo tanto, para poder ofrecer una batería de tensión de 48 V se necesitan 16 celdas en serie por cada rama en paralelo de la batería. Además, el número de ramas en paralelo de dicha batería vendrá determinado por la capacidad global de la misma, ya que cada rama tiene una capacidad de 2.32 Ah. Por lo tanto, al ser el número de ramas un número entero, en algunas ocasiones puede suceder que la capacidad de la batería sea ligeramente inferior a la deseada.

Adicionalmente se ha añadido al estudio un generador diesel o gasolina que proporciona potencia en los momentos en los que la batería no es capaz de aportarla, además de cargar la batería cuando el estado de carga llega al límite inferior, lo que podría ayudar considerablemente en la selección de la capacidad de la batería para una vivienda autónoma.

En cuanto al grupo fotovoltaico utilizado se trata de un equipo de 2400 Wp colocado con una inclinación de 60 grados y orientación sur, además se dispone de un inversor de 900 VA. La eficiencia de carga y descarga de la batería es del 92.2 %.

Como dato de referencia, se tiene que las baterías adecuadas para este sistema fotovoltaico autónomo (sin generador de respaldo) con el consumo citado eran de plomo-ácido y tenían una capacidad de 18.72 kWh. Además, su vida útil era de aproximadamente 18 años o 4000 ciclos.

A parte de la propia implementación de dichos modelos, se han añadido indicadores para facilitar el posterior estudio de los casos, tal como la tasa de energía no servida respecto del total, las horas que la batería no sirve energía, las horas que debe actuar el generador de respaldo del que se dispone, o la cantidad de horas hasta EOL de la batería.

Un criterio de diseño que suele ser utilizado para calcular el tamaño adecuado de batería necesario es que ésta pudiera proporcionar la energía del consumo durante cuatro días sin ningún tipo de carga. Para los valores de los que se disponen, los resultados son que el consumo total del año es de aproximadamente 1325 kWh, consumiendo diariamente 3.63 kWh. La energía que se consumiría en cuatro días consecutivos sería de 15.3 kWh, o lo que es lo mismo 318.4 Ah a 48 V.

Como parte común a la implementación de todos los modelos se ha realizado un estudio para cada una de las horas que lo componen que facilitará dichos estudios. Como ya se ha mencionado anteriormente, tanto la potencia de consumo como la de fotovoltaica son datos en Watios. Para cada hora, se calcula: Potencia del generador diésel, así como de carga y descarga de la batería según corresponda en Watios, la energía no servida (potencia en dicha hora)

también en Watios, la Intensidad total que recorre la batería, además de esa intensidad corregida, la intensidad por cada grupo en paralelo, y el módulo de la misma, todas ellas en Amperios, y el SOC al final de la hora. Además, el parámetro llamado Qend, es el sumatorio de toda la intensidad que ha recorrido la batería a lo largo de toda su vida en Amperios hora.

De cara al cálculo del número de ciclos hasta el momento se tiene en cuenta la intensidad total de carga y descarga de la batería desde el BOL divide por la capacidad de cada celda de la misma (2.32 Ah) y por 2, ya que un ciclo se compone de una parte de carga y otra de descarga.

MODELO DE ESTUDIO "A"

Este modelo de estudio se basa en el artículo científico "Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells" (Wang, J. et al, 2014).

A la hora de implementar este modelo hay que tener en cuenta que no se debe aplicarlo año a año de forma independiente, sino que se debe aplicar de manera acumulada, realizando el cálculo al final de cada año teniendo en cuenta todo el periodo de vida de la batería.

$$Q_{\text{loss}} = B \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370.3 \times \text{C.Rate}}{RT} \right] (A_h)^{0.55}$$

Ecuación 1. Cálculo capacidad tras un periodo de tiempo. Modelo A. (Wang, J. et al, 2011)

Para cada iteración anual se debe tener en cuenta tanto la temperatura media de cada año en Kelvin, el C-rate medio desde el BOL, y el número de ciclos hasta ese momento, también desde el BOL. Una vez se tienen todos estos datos se puede calcular el porcentaje de capacidad perdida desde el BOL y, por consiguiente, la capacidad en cada momento de la batería.

La implementación de este modelo está detenidamente explicada en el Anexo 1.

MODELO DE ESTUDIO "B"

Este modelo de estudio se basa en el artículo científico "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Ageing Models" (Groot, J. 2014).

Para cada hora del estudio se calculan todos los parámetros que conforman el cálculo de $K_{\text{LOSS A/L}}$ y el parámetro CT. Cabe destacar que con cada nueva hora se reinicializa la vida de la batería de cara a la realización de los cálculos, dado que el BOL de cada iteración es la capacidad al final de la hora anterior.

$$C = C_{\text{BOL}} \cdot \left(1 - K_{\text{LOSS A/L}} \right)^{CT}$$

Ecuación 2. Cálculo capacidad tras un periodo de tiempo. Modelo B. (Groot, J. 2014)

Para poder realizar una mejor comparación con los otros modelos de iteración anual, frente a este que es horario, se realiza una tabla resumen en la que únicamente se selecciona aquellas casillas de dicha iteración horaria que corresponden con el final de cada año de estudio.

La implementación de este modelo está detenidamente explicada en el Anexo 2.

MODELO DE ESTUDIO "C"

Este modelo de estudio se basa en el artículo científico "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Ageing Models" (Groot, J 2014) y está implementado a partir de la misma fuente que el modelo de estudio B. Sin embargo, en este caso no se realiza iteración horaria, sino anual.

Para ese motivo, existen ligeras modificaciones entre este modelo y el anterior, localizadas en el cálculo del K_{TI} y del K_{SOC} , tanto de la celda como del ánodo. La diferencia es que, para cada iteración horaria del modelo anterior, se multiplican dichos parámetros correspondientes al modelo B por la intensidad que soporta la batería en esa hora, para posteriormente poder sumar todos esos productos de cada una de las horas del año, y dividir dicha suma por la intensidad total que ha recorrido la batería ese año.

Además, en cuanto a los parámetros referentes al SOH de la batería, simplemente se calculan para los resultados de iteración anuales, frente a los de iteración horaria del modelo anterior.

Una vez se tiene todos los parámetros correspondientes se puede proceder al cálculo de K_{LOSS} , tanto de la celda como del ánodo, y poder así ver cómo va progresando la capacidad de la batería de forma anual.

$$C = C_{BOL} \cdot (1 - K_{Loss,A/L})^{CT}$$

Ecuación 3. Cálculo capacidad tras un periodo de tiempo. Modelo C. (Groot, J. 2014)

Cabe destacar que como en el caso anterior, en cuanto a los cálculos se refiere, la vida de la batería se reinicializa ya que se toma como BOL el final del año anterior en este caso.

La implementación de este modelo está detenidamente explicada en el Anexo 4.

MODELO DE ESTUDIO "D"

Este modelo de estudio se basa en el artículo científico "On the complex ageing characteristics of high-power LiFePO₄/graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents" (Groot, J. et al, 2015).

Se sabe que este modelo es de menor eficacia de cara a la estimación de la vida útil de la batería para este perfil de consumo, ya que como se ha explicado en el anexo 3, este modelo es bueno para baterías con perfiles de ciclos simétricos. A pesar de todo, se ha decidido incluir en este trabajo para conocer el porcentaje de error que tiene cuando se trata de perfiles no simétricos como el utilizado.

Dado que se dispone de los mismos datos de consumo y carga fotovoltaica anuales, se ha optado por realizar el cálculo solamente con esos datos de un año, y no hacerlo con los de otros años ya que el resultado sería el mismo.

$$Q_{EOL} [kAh] = \left(a \cdot e^{b \cdot I} \cdot T^{(c \cdot I^2 + d \cdot I + e)} \right) + f$$

Ecuación 4. Cálculo kAh que puede ciclar una batería en su vida. Modelo D. (Groot, J. et al, 2015)

Para poder aplicar la ecuación, se obtiene la intensidad media anual, así como la temperatura media del mismo. El resultado de la ecuación es la cantidad de corriente en kAh que sería capaz de ciclar la batería hasta su EOL, y dado que se sabe la cantidad de corriente que cicla cada año, se pueden obtener los años de vida estimados.

La implementación de este modelo está detenidamente explicada en el Anexo 3.

COMPROBACIÓN DE LOS MODELOS

Previamente al estudio de los casos, se estudia la fiabilidad de los modelos implementados en Excel para corrientes de carga y descarga (C-rate) iguales a C/2, lo cual es bastante superior a las corrientes que se suelen dar en fotovoltaica.

Para ello, se ha planteado un caso cíclico de carga y descarga de la batería estudiada en la tesis doctoral de Chalmers University of Technology of Sweeden – (Groot, J. 2014)-, y en las mismas condiciones. Es decir, con corrientes

de carga y descarga en una hora iguales a la mitad de su capacidad, y para las tres temperaturas para las que se había estudiado en el estudio del modelo A.

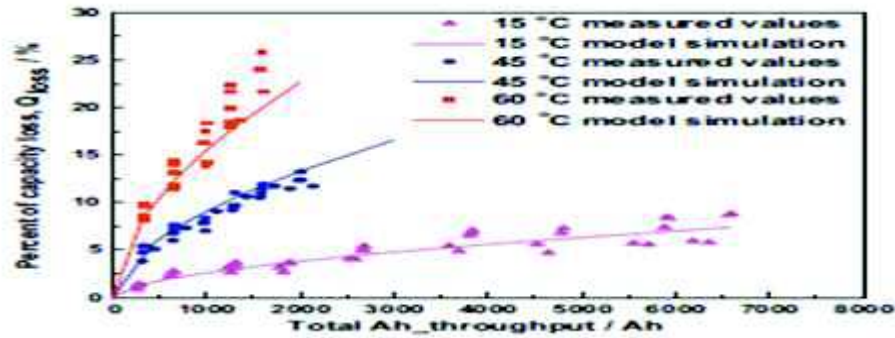


Figura 2. Comparación de la predicción del ciclo de vida vs datos experimentales realizado a C-rate de C/2 y a diferentes temperaturas. (Wang, J. et al, 2011)

El resultado esperado es un porcentaje de pérdida de la capacidad de la célula en función del número de ciclos que ha sufrido la batería y a qué temperatura se ha visto expuesta.

El resultado ha sido que para el modelo A, los resultados obtenidos se ajustan perfectamente a los resultados esperados, mientras que los modelos B y C son bastante más pesimistas a partir del primer año de cálculo.

Los resultados de esta comprobación previa de los modelos se pueden consultar más detalladamente en el anexo 5.

CASOS DE ESTUDIO

Durante todo este trabajo se ha centrado la atención en el estudio de la capacidad de la celda, la cual es el aspecto crítico para estimar la vida útil de la batería, ya que de los resultados de todos los casos se puede observar que la vida del ánodo es mucho más larga que la de la celda.

Este trabajo ha sido realizado con un horizonte temporal de 30 años para todos los modelos y casos de estudio y se ha indicado, para cada resultado, la estimación de años de vida útil de la batería o la vida remanente de la misma, si al final de los 30 años no llegaba al EOL.

CASO 1. Batería Pequeña sin generador diésel auxiliar

Para este primer caso se ha considerado la posibilidad de tener, simplemente, una pequeña batería de ión de litio (10Ah) para abastecer una pequeña vivienda de la que se dispone de datos de consumo y carga fotovoltaica horaria.

En este caso, al ser una batería tan pequeña, va a estar mucho tiempo de su vida en el mínimo de SOC que se ha fijado para este caso, el cual era el 5% de la misma. Al ser únicamente de 10Ah, los periodos en los que se le permite cargarse no serán aprovechados convenientemente ya que se alcanzará demasiado pronto su carga máxima. Además, en cuanto se le exija dar potencia va a quedar descargada en seguida, sin proporcionar energía 134.764 horas en los 30 años (51,28 % del tiempo), y ofreciendo un pésimo ratio de energía no servida del 32,36% del total.

SOC min	5%
Horas que no proporciona energía	134.764 (51,28% del tiempo)
Ratio energía no servida	32,36%

Tabla 1. Energía no servida. Caso 1

Asimismo, como se ha comentado previamente, para el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo eficaz se establece comúnmente que la batería pueda proporcionar suministro durante cuatro días sin ser cargada (días nublados). Por tanto, para este tipo de consumo, se necesitaría una batería de 318.42 Ah, lo cual no es ni de lejos cercano a los 10 Ah de la batería estudiada en este caso.

En el modelo A se estima que la batería ha perdido solamente el 17.66% de su capacidad al cabo de los 30 años, por lo que todavía le queda el 82.34% de capacidad, mientras que el modelo B y C estiman que la batería llegará al EOL al cabo de poco más de 6 años.

Se considera que una batería ha llegado al EOL cuando ha perdido el 20% de su capacidad.

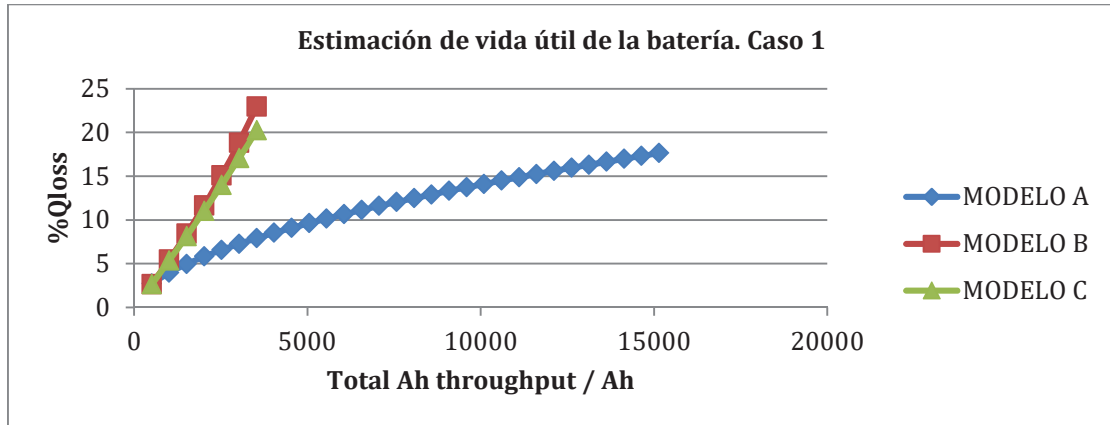


Figura 3. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 1

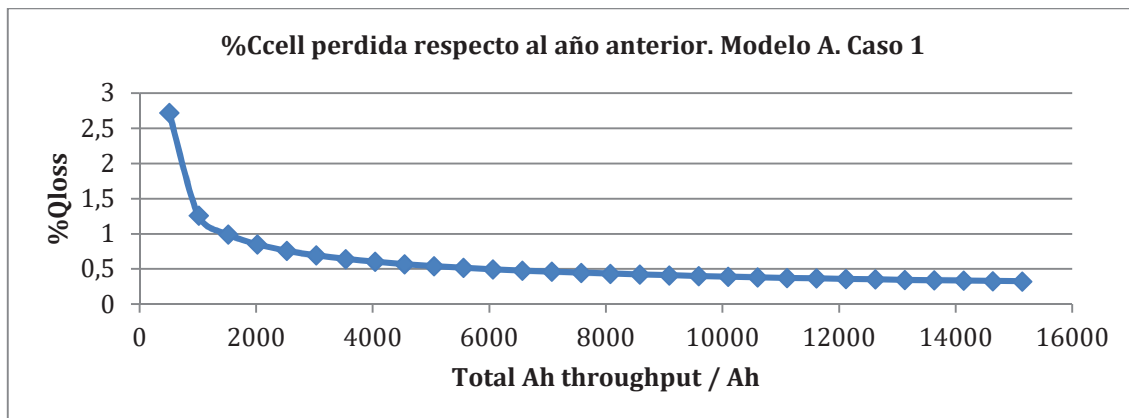


Figura 4. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 1

Para este caso del modelo A se puede apreciar que la mayor degradación anual se produce durante el primer año de vida, y que conforme van aumentando los ciclos, la degradación de la celda es menor para un igual número de ciclos realizados.

De estos resultados se puede extraer que el porcentaje de capacidad perdido de la celda anualmente es constante, dado el carácter lineal de las gráficas correspondientes a estos modelos.

Además, como ya se ha visto en el apartado de comprobación de los modelos, los modelos B y C son bastante más pesimistas en cuanto a la vida útil en baterías de pequeña capacidad como este caso (10Ah).

¹ Todas las tablas y gráficas en las que no se indique lo contrario son de elaboración propia.

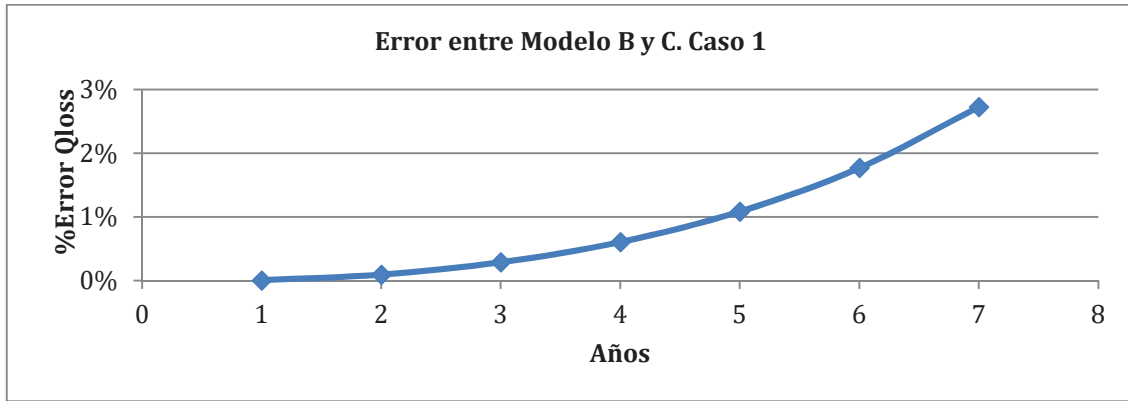


Figura 5. Error entre Modelo B y C. Caso 1

Dado que los modelos B y C han sido extraídos de la misma tesis doctoral y solamente se diferencian en el modo de cálculo, como se ha explicado anteriormente en este informe, se ha creído conveniente comparar el error entre ambos a lo largo de los años.

Los resultados son interesantes, ya que dicho error tiene una forma exponencial, aunque es relativamente bajo. Por lo tanto, para este caso concreto de una batería pequeña, un error de en torno al 3% al cabo de unos 7 años sería admisible.

Además, se ha estimado también la vida útil de la batería mediante el modelo D. El resultado que se ha obtenido es que la batería puede ciclar unos 12.5 kAh, lo que equivale a algo más de 5 años de vida útil.

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
12,47574211	5,322654215

Tabla 2. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 1

Esta esperanza de vida podría verse mejorada por el hecho de no dejar descargarse tanto a la batería e imponer un estado de carga mínimo SOCmin del 20%, pero al ser la proporción de energía no servida tan elevada, este caso es inviable. Por tanto, se debería colocar un generador diésel que supliría dichas carencias, o bien estudiar la colocación de una batería de mayor tamaño.

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 6.

CASO 2. Batería pequeña con generador de respaldo auxiliar

Dada la mala tasa de energía no servida que se ha encontrado en el caso anterior con una batería pequeña, se ha creído adecuado realizar el estudio de esa misma batería (10 Ah) apoyada por un generador de respaldo de 1000 W (gasolina) que solamente actúe cargando la batería cuando esta esté descargada en el SOC mínimo (5%) y no sea capaz de proporcionar potencia.

Para este caso la tasa de energía no servida será nula, pero el generador debería actuar 32.220 horas, lo que equivaldría a 3,67 años del estudio y correspondería a un 12,3% del tiempo de los 30 años.

Este hecho lo hace un sistema bastante ineficiente, ya que el generador debería estar de apoyo para hechos puntuales que pudieran suceder, y no ser el que proveyera de energía a la batería durante tanto tiempo.

SOC min	5%
Horas que no proporciona energía	0
Ratio energía no servida	0%
Horas que actúa generador diésel	32.220 (3,67 años)

Tabla 3. Energía no servida. Caso 2

En cuanto a la estimación de la vida útil de la batería, para el modelo A la duración va a ser de casi 16 años, mientras que para el modelo B va a ser de casi 3 años completos, y de algo más de 3 años para el modelo C. Por su parte, el modelo D estima una vida útil de unos 4 años.

A pesar de las diferencias entre modelos, todos ellos coinciden en que la batería ayudada con un generador diésel que le apoye llegará más pronto a su EOL.

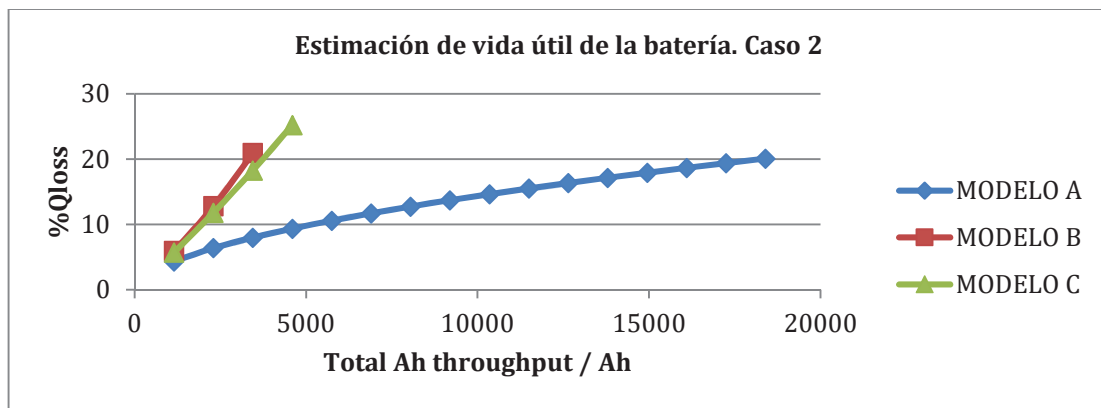


Figura 6. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 2

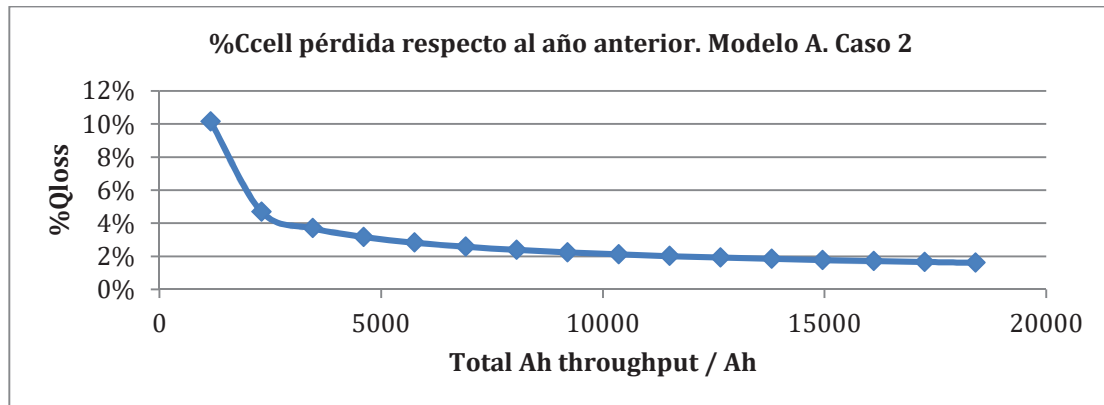


Figura 7. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 2

Del mismo modo que para el caso 1, se puede observar que en este modelo A la capacidad perdida anualmente no sigue una forma lineal, mientras que los modelos B y C sí lo hacen. Además, el error entre los modelos B y C sigue teniendo forma exponencial, a pesar de que en este caso es el doble que para el caso 1, y empezaría a no ser del todo válido.

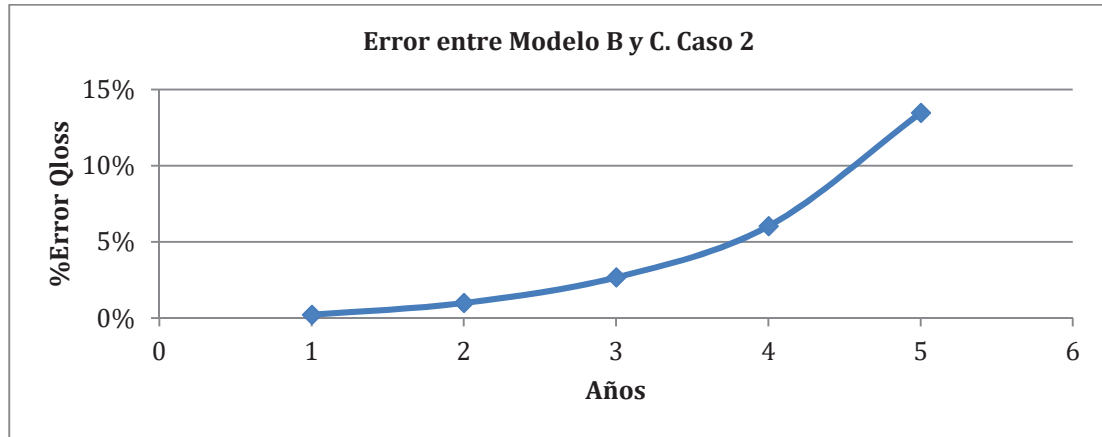


Figura 8. Error entre Modelo B y C. Caso 2

Por otra parte, mediante la aplicación del modelo D se ha obtenido que podría llegar a ciclar 21,4 kAh, lo que equivale a una vida útil de unos 4 años.

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
21,43889942	4,018388431

Tabla 4. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 2

A la vista de los resultados está que el modelo A es bastante más optimista que el resto de modelos en cuanto al tiempo hasta el EOL de baterías de pequeño tamaño.

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 7.

CASO 3. Batería muy grande sin generador diésel auxiliar

A pesar de que para el caso anterior la tasa de energía no servida era nula debido al encendido del generador diésel, el cual cargaba la batería cuando llegaba esta al 5% de carga mínima, se cree que es un sistema muy ineficiente ya que el porcentaje de horas que debe estar activado dicho generador es muy grande.

En este caso se estudia el comportamiento de una batería grande (500Ah) en esta instalación sin ningún tipo de generador externo, y la cual tiene los mismos datos de consumo y generación fotovoltaica que en casos anteriores.

Los resultados son buenos, ya que al ser tan grande puede aprovechar perfectamente los periodos de carga, a diferencia de la batería pequeña. Este hecho le permite ofrecer, también, una tasa de energía no servida nula, por lo que no necesita ningún generador diésel de apoyo.

SOC min	5%
Veces que no proporciona energía	0
Ratio energía no servida	0%
Veces que actúa generador diésel	0

Tabla 5. Energía no servida. Caso 3

Anteriormente, se ha comentado que uno de los criterios de diseño para la instalación de baterías en una estación fotovoltaica es que puedan proporcionar potencia durante 4 días consecutivos nublados sin recibir carga alguna. Para estos datos de consumo de los que se disponen se necesitaría una batería de 318,42 Ah, por lo tanto, la batería de 500Ah podría permitir el consumo durante 6,6 días.

En cuanto a la estimación de la vida útil de la batería, mediante el modelo A se obtiene que la batería aún tiene el 96,12% de capacidad al cabo de los 30 años de estudio, es decir, solamente ha perdido el 3,88% de su capacidad de celda en el BOL. Un dato curioso es que la pérdida de capacidad de la celda del primer año es proporcionalmente bastante mayor a los casos anteriores de baterías pequeñas.

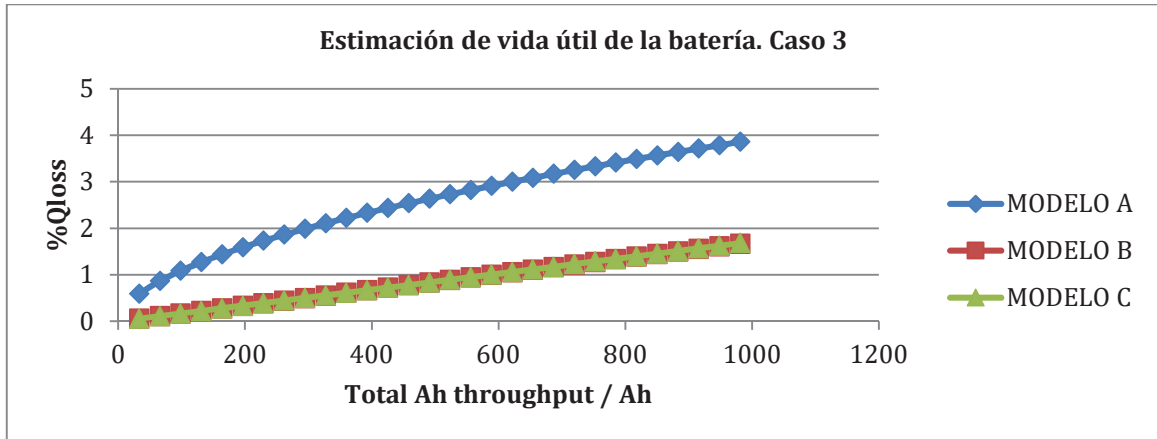


Figura 9. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 3

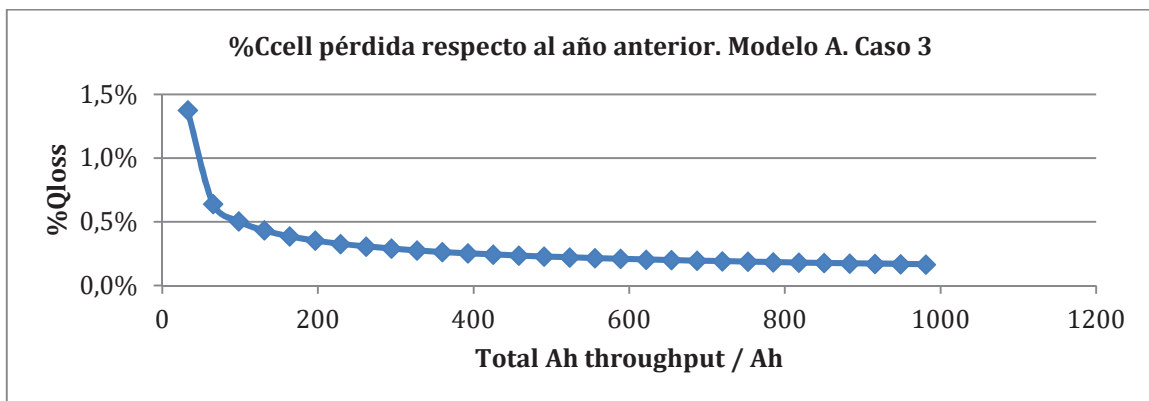


Figura 10. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 3

Además, por primera vez en todo el estudio, la estimación del modelo A y los modelo B y C se aproximan más que en casos anteriores, siendo la de estos últimos la que certifica que le quedará a la batería al cabo de los 30 años en torno al 98.33% de capacidad todavía, por lo que solamente habrá perdido el 1,67 % de su capacidad de celda en el BOL. Para el caso del modelo D se estima que la duración de la vida útil es de 189 años.

Del mismo modo que para casos anteriores, se puede apreciar que la pérdida de capacidad anual de los modelos B y C es lineal y la forma del error entre ambos modelos es exponencial. En cambio, para este caso de estudio con una batería grande el error entre ambos modelos es prácticamente nulo.

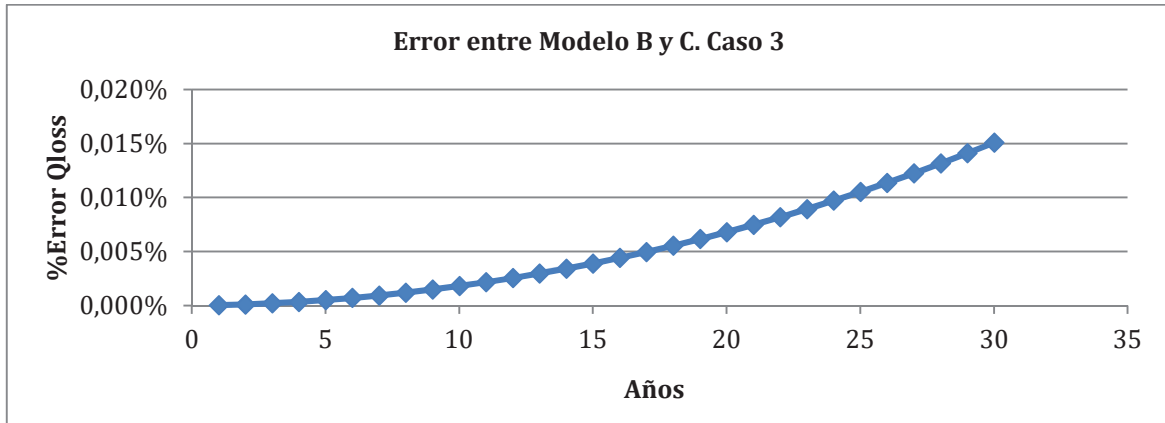


Figura 11. Error entre Modelo B y C. Caso 3

Cabe destacar que, en este caso, al ser la batería bastante más grande que en casos anteriores, el número de ciclos que sufre la batería es mucho menor, a pesar de que la corriente que llega a ciclar sea mayor que para una batería pequeña.

En cuanto al modelo D, este estima que la vida útil de la batería sería de unos 189 años, que a priori puede parecer mucho, pero dado que el modelo B y C estiman que se ha perdido el 1,67% de capacidad en 30 años, y dado su carácter lineal, es fácil estimar que estos modelos estiman un tiempo de vida hasta el EOL de aproximadamente 359 años.

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
28,57373274	189,2488506

Tabla 6. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 3

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 8.

CASO 4. Batería requerida para dar cuatro días de abastecimiento sin generador diésel auxiliar

En el caso anterior se ha visto que una batería de 500 Ah es demasiado grande para el consumo de una vivienda autónoma como esta, por lo que en este caso se plantea el estudio de la implantación de una batería que pueda llegar a proporcionar cuatro días de consumo como criterio de diseño (320 Ah).

A pesar de reducir la capacidad de la batería respecto al caso anterior, con estos datos de consumo y carga fotovoltaica el ratio de energía no servida sigue siendo nulo. Por lo tanto, este criterio de diseño se cumple perfectamente.

SOC min	5%
Horas que no proporciona energía	0
Ratio energía no servida	0%

Tabla 7. Energía no servida. Caso 4

Los resultados de esperanza de vida útil son también bastante buenos, ya que el modelo A estima que al cabo de los 30 años la batería aún tendrá el 95,05% de su capacidad, por lo que solamente ha perdido el 4,95% de capacidad de celda desde el BOL, y tanto el modelo B como el C estiman que también durará más de 30 años completos teniendo, al fin de los mismos, un 98,3% de capacidad, o lo que es lo mismo un 2,4% de pérdida de capacidad desde el BOL. Además, el modelo D estima una vida útil de 113 años.

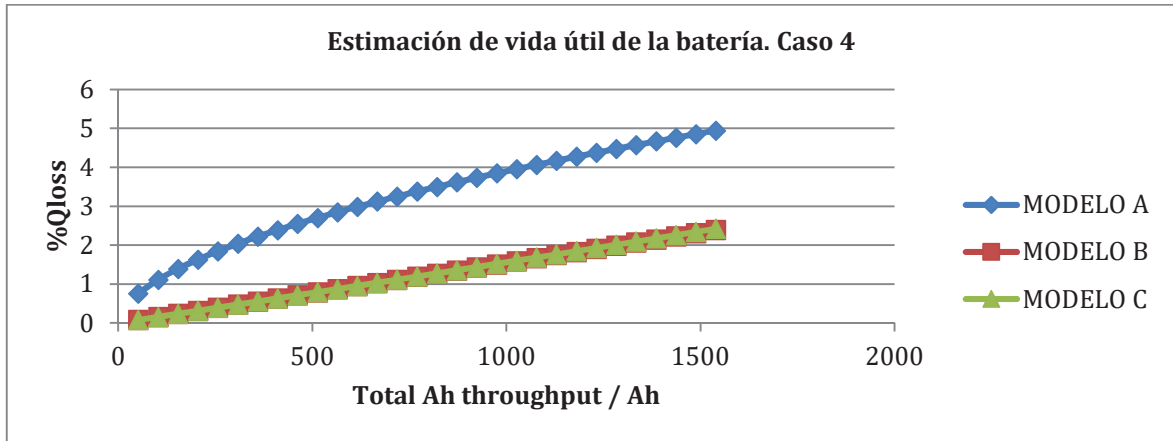


Figura 12. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 4

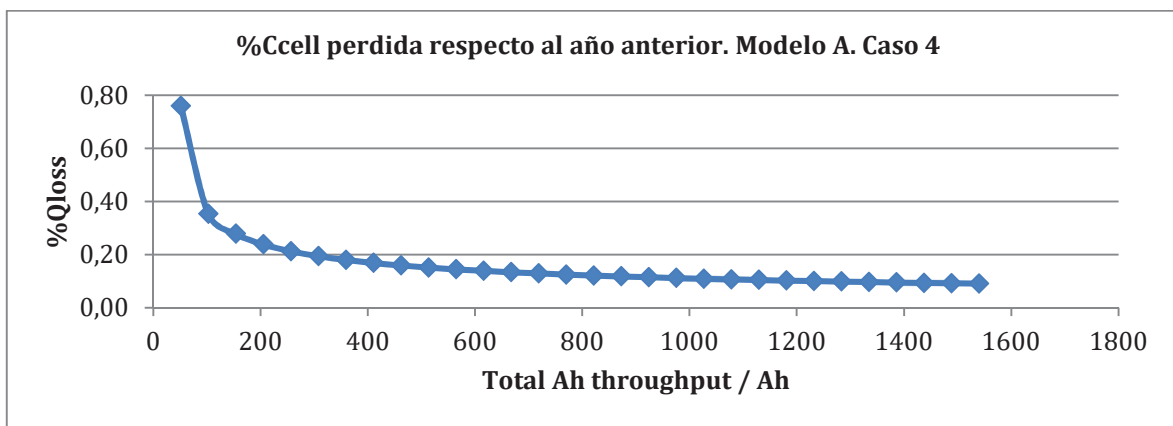


Figura 13. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 4

Mediante este estudio se confirma que aplicando el modelo A a baterías de tamaño grande, el porcentaje de capacidad perdida el primer año de vida es proporcionalmente mucho mayor que para el caso de baterías pequeñas.

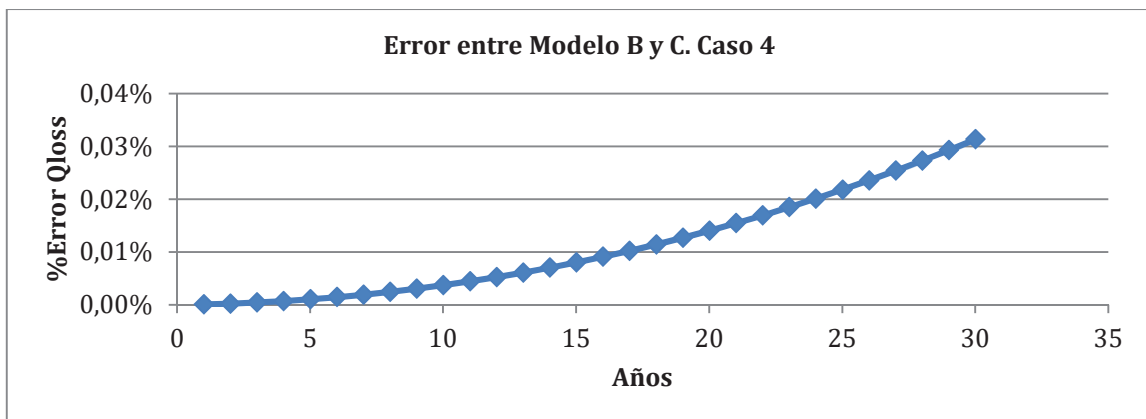


Figura 14. Error entre Modelo B y C. Caso 4

Del mismo modo que en el anterior modelo, el error entre los modelos B y C es aproximadamente nulo, por lo que se puede decir que ambos modelos se pueden aplicar indistintamente para el estudio de estas baterías de gran tamaño.

Además, dado que la batería es más pequeña que para el caso anterior, lógicamente, la vida útil de la misma será ligeramente inferior también.

En cuanto al modelo D, este estima una vida útil de la batería de aproximadamente 114 años, pero de igual modo que se ha calculado para el caso anterior, los modelos B y C estiman una vida útil de 250 años.

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
27,01030315	113,9929094

Tabla 8. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 4

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 9.

CASO 5. Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula

En este caso se va a estudiar la posibilidad de colocar una batería un poco más pequeña que para el caso anterior, la cual sea la mínima batería que tenga una tasa de energía no servida nula. Para estos datos de consumo y carga fotovoltaica se ha obtenido que dicha batería sería de 240 Ah.

SOC min	5%
Veces que no proporciona energía	0
Ratio energía no servida	0%

Tabla 9. Energía no servida. Caso 5

La desventaja de esta batería es que si no recibiera ningún tipo de carga, solamente podría permitir el consumo durante algo más de 3 días (3.17 días), lo que incumple el criterio de diseño explicado de proporcionar potencia durante 4 días sin ser cargada. Por lo tanto, esto únicamente sería permisible en ciertos emplazamientos de la vivienda.

Por el contrario, la instalación de esta batería supondría un ahorro en la inversión inicial respecto de las otras baterías más grandes estudiadas en casos anteriores, ofreciendo la misma tasa de energía no servida.

En cuanto a la esperanza de vida útil de la batería, el modelo A estima que, al cabo de los 30 años de estudio, la batería todavía tendría un 94.2% de capacidad, dado que solamente habría perdido el 5,8% de su capacidad. En cuanto a los modelo B y C estiman, también, que la batería durará más de 30 años, teniendo al final de los mismos aún una capacidad del 96,7%, ya que solamente habría perdido el 3,3% de la capacidad desde el BOL. Por otro lado, el modelo D estima que la batería tendrá una vida útil de 81 años.

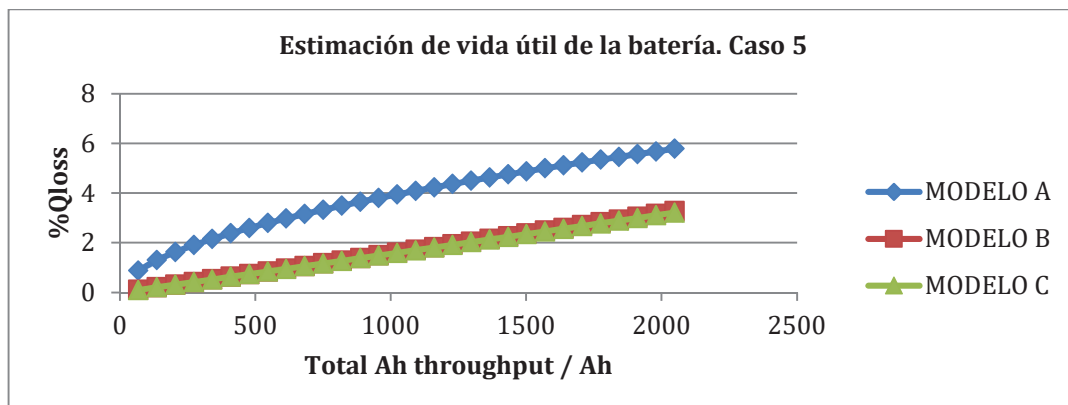


Figura 15. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 5

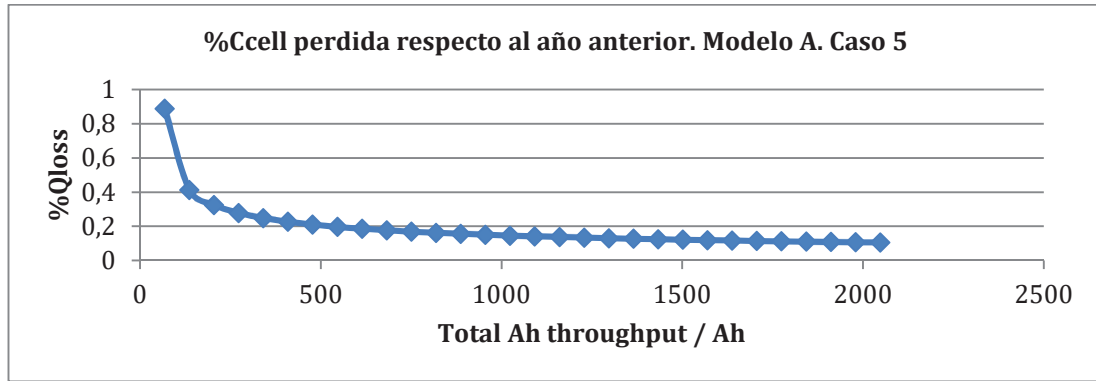


Figura 16. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 5

Con el estudio de este caso se sigue manteniendo la tónica general de los anteriores en los que se pierde proporcionalmente mucha más capacidad durante el primer año para baterías medianas y grandes que para baterías de pequeña capacidad.

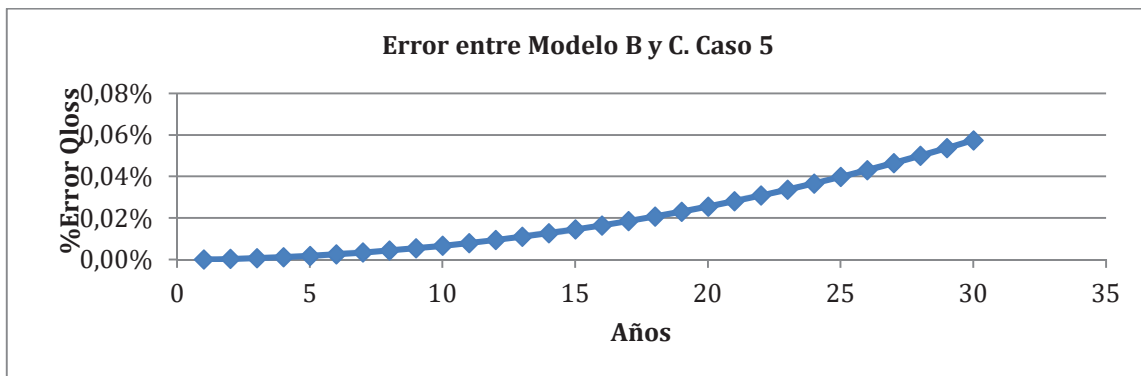


Figura 17. Error entre Modelo B y C. Caso 5

Como diferencia respecto al caso anterior, se aprecia que los años de vida útil estimados por los modelos B y C son de 182 años (68 años menos que para el caso anterior), disminuyendo proporcionalmente en mayor medida que el modelo D, el cual es en este caso aproximadamente de unos 81 años (32 años menos que para caso anterior).

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
25,71030631	81,57785612

Tabla 10. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 5

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 10.

CASO 6: Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula en consumo aleatorio

Una vez ha sido estudiada la batería mínima que daría una tasa de energía no servida nula para unos determinados datos, se estudia si se comportaría de la misma forma con datos de consumo del mismo orden, pero aleatorios en cierta medida, como podría darse en una vivienda normal en la vida diaria.

La generación de datos aleatorios de temperatura ha sido descartada dada la incongruencia que eso supondría, ya que existe una razonable continuidad en la temperatura a lo largo de las 24 horas del día. Del mismo modo, se ha realizado la misma operación con el caso de la carga fotovoltaica ya que carecería de sentido que en las horas de la noche existiera una potencia de carga de las baterías proveniente de los paneles fotovoltaicos.

Para los datos que disponíamos, el máximo valor de consumo era 308 W, con una media de 151,25 W. Para este estudio se define que los datos de consumo sean aleatorios entre 0 y dicho máximo, y los resultados obtenidos son que, para la mayoría de casos estudiados, la batería no proporciona energía aproximadamente durante unas 800 horas, y la tasa de energía no servida es de aproximadamente un 0,3 %, lo cual es perfectamente asumible para una vivienda de estas características con un consumo medio.

SOC min	5%
Horas que no proporciona energía	800
Ratio energía no servida	0,3%

Tabla 11. Energía no servida. Caso 6

En cuanto a la estimación de la vida útil, el modelo A dictamina que para la gran mayoría de casos aleatorios al final de los 30 años de estudio la batería aún tendrá en torno al 94% de su capacidad en el BOL. Para el caso de los modelos B y C, los resultados son los mismos, ya que al fin de los 30 años estiman, ambas, que tendrán, también, en torno al 96 % de su capacidad en el BOL.

PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE CAPACIDAD DE CELDA AL CABO DE 30 AÑOS	
MODELO A	6 %
MODELO B y C	4 %

Tabla 12. Porcentaje pérdida capacidad al fin del estudio. Caso 6

Además, el modelo D estima que esta batería de 240 Ah sometida a consumo aleatorio tendrá una vida útil de aproximadamente 61 años. Por su parte, los modelos B y C dadas sus características de linealidad de la pérdida de capacidad a lo largo de los años, estiman que la vida útil de la batería es de 150 años

CASO 7. Estudio de influencia de la capacidad de la batería con la instalación de un generador de 300 W y 500 W

Una vez se conoce cuál es la capacidad mínima que ha de tener la batería sin ayuda de un generador de respaldo externo para poder dar una tasa de energía no servida nula, se plantea la posibilidad de instalar un generador de apoyo de 300 W y, posteriormente, uno de 500 W. En este caso se va a comparar la influencia que tienen las distintas capacidades de las baterías en la tasa de energía no servida, así como en las veces que debe actuar el generador.

Cabe destacar que, en este caso de estudio, para poder realizar una mejor comparación entre las capacidades de las baterías, se ha vuelto a tomar los datos de consumo que se tenían previamente, y no han sido generados de forma aleatorio como en el caso anterior. Dado que la batería mínima para dar una energía no servida nula sin ayuda de ningún generador es de 240 Ah, los valores de capacidad de batería a estudiar serán inferiores a esta.

CASO GENERADOR 300 W

Capacidad Batería (Ah)	E no servida respecto del total (%)	Horas que no se sirve energía	Horas que actúa generador diésel
10	0,00257	99	297
30	0	0	61466
50	0,03329	3176	10375
70	0,00084	418	1165
90	0,00048	240	840
110	0,00036	178	802
130	0,00024	120	1046
150	0,00012	60	630

Tabla 11. Caso generador 300 W. Caso 7

Esta no linealidad que existe para estos tres indicadores se debe a que el generador diésel no actúa cargando la batería hasta que, al término de las horas, el SOC de la batería es del 5%. De este modo, si desafortunadamente el SOC de la batería es ligeramente superior al final de una hora y se le exige proporcionar potencia, el generador diésel no actuaría hasta la hora siguiente ya que el SOC sería previsiblemente 5%, pero la batería habría dado servicio muy poco porcentaje de tiempo de esa hora.

Por lo tanto, a pesar de que este estudio depende fuertemente de los datos de consumo concretos, se puede observar que a partir del estudio de baterías de 70 Ah y mayores esta linealidad sí existe, siendo menores los tres indicadores de estudio conforme se aumenta la capacidad de la batería.

Debido a esto, en las gráficas siguientes los valores de capacidad de batería inferiores a 70 Ah no han sido representados.

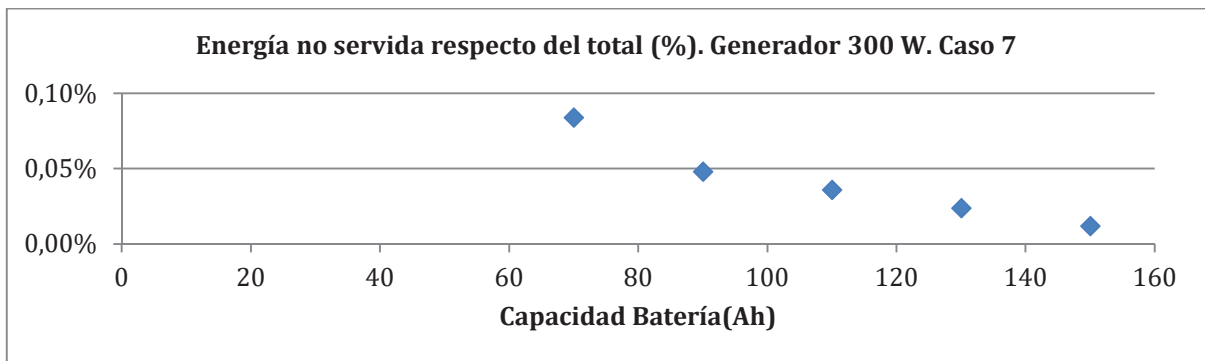


Figura 18. Energía no servida. Generador 300 W. Caso 7

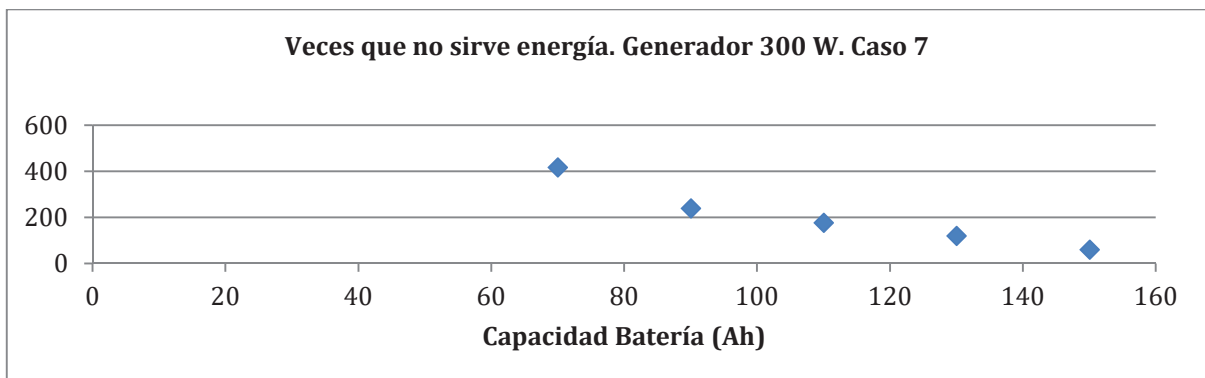


Figura 19. Veces que no sirve energía. Generador 300 W. Caso 7

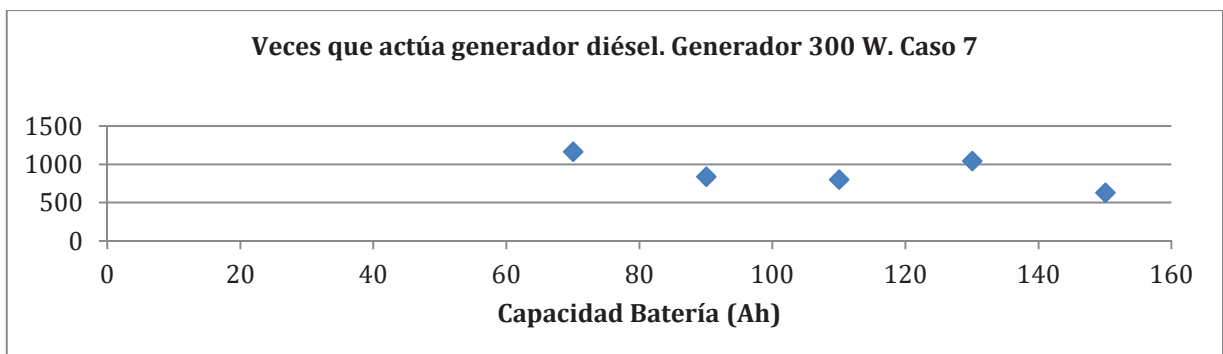


Figura 20. Veces que actúa generador diésel. Generador 300 W. Caso 7

Además, se han aplicado los cuatro modelos que se están usando en todo este trabajo para realizar la estimación de la vida útil de la batería al cabo de 30 años, obteniendo los resultados:

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo A (años)	Capacidad a los 30 años modelo A (Ah)
10	22	-
30	30	1,92298
50	30	1,99613
70	30	2,05334
90	30	2,08626
110	30	2,11236
130	30	2,13201
150	30	2,14531

Tabla 12. Modelo A. Generador 300 W. Caso 7

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo B (años)	Capacidad a los 30 años modelo B (Ah)
10	4,5	-
30	18	-
50	30	1,97524
70	30	2,13426
90	30	2,167413
110	30	2,1888
130	30	2,20373
150	30	2,21726

Tabla 13. Modelo B. Generador 300 W. Caso 7

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo C	Capacidad a los 30 años modelo C (Ah)
10	5,5	-
30	20	-
50	30	2,0047
70	30	2,142851
90	30	2,173045
110	30	2,192887
130	30	2,2069
150	30	2,21973

Tabla 14. Modelo C. Generador 300 W. Caso 7

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo D (años)
10	3,3
30	5,7
50	9,6
70	15,93
90	22,25
110	29,96
130	37,95
150	45

Tabla 15. Modelo D. Generador 300 W. Caso 7

A pesar de que en todos los modelos estudiados se da una progresión positiva en cuanto a ampliación de la vida útil conforme se aumenta la capacidad de la batería, es interesante darse cuenta de que el modelo A es bastante más optimista en cuanto a la vida de las baterías más pequeñas, pero conforme se aumenta la capacidad de la batería, los modelos B y C van estimando cada vez más tiempo de vida de la batería que el modelo A.

CASO GENERADOR 500 W

Capacidad Batería (Ah)	E no servida respecto del total (%)	Horas que no se sirve energía	Horas que actúa generador diésel
10	0	0	38759
30	0	0	37498
50	0,0347	898	8696
70	0	0	956
90	0,00109	30	660
110	0	0	390
130	0	0	480
150	0	0	300

Tabla 16. Caso generador 500 W. Caso 7

De igual forma que para el caso anterior existen algunas no linealidades en el caso de las baterías de de capacidad 50 y 90 Ah.

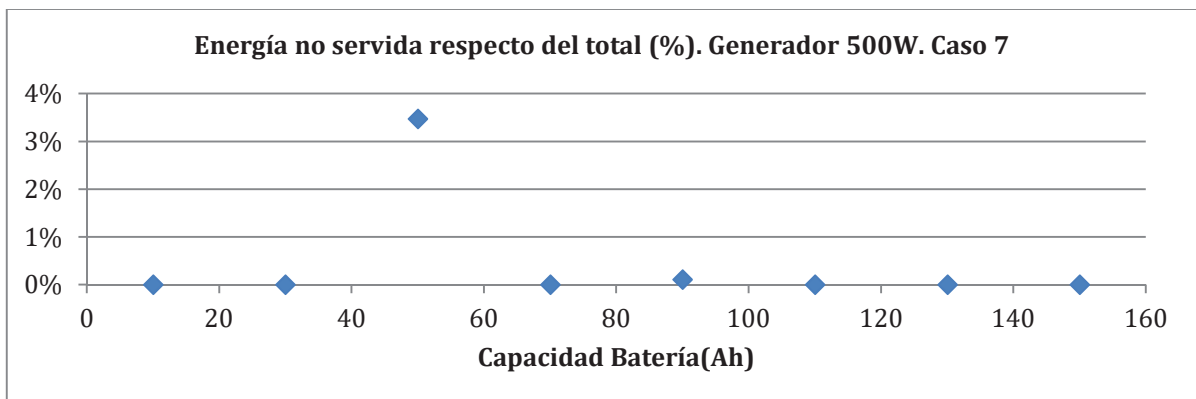


Figura 21. Energía no servida. Generador 500 W. Caso 7

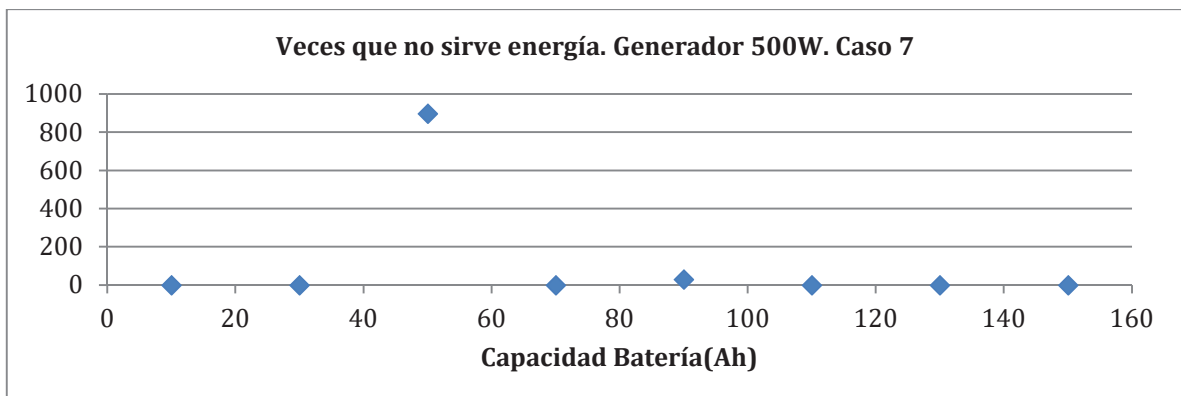


Figura 22. Veces que no sirve energía. Generador 500 W. Caso 7

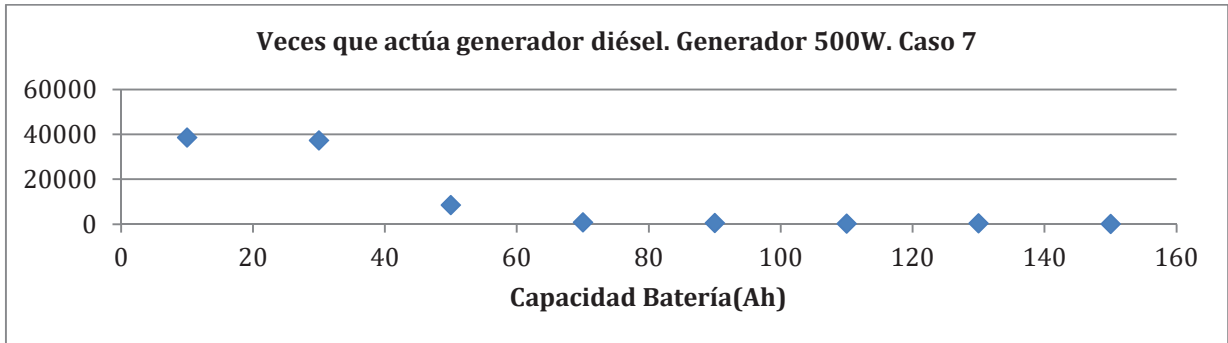


Figura 23. Veces que actúa generador diésel. Generador 500 W. Caso 7

Para este estudio de cuántas veces actúa el generador diésel según la capacidad de la batería, se ve claramente que una capacidad de batería pequeña es altamente ineficiente, y que conforme se aumenta dicha capacidad, el valor de este indicador disminuye.

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo A (años)	Capacidad a los 30 años modelo A (Ah)
10	20	-
30	30	1,90907
50	30	1,099722
70	30	2,05333
90	30	2,08624
110	30	2,1124
130	30	2,13157
150	30	2,14514

Tabla 17. Modelo A. Generador 500W. Caso 7

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo B (años)	Capacidad a los 30 años modelo B (Ah)
10	3	-
30	17	-
50	30	1,98396
70	30	2,1344
90	30	2,1674
110	30	2,18924
130	30	2,20456
150	30	2,2167

Tabla 18. Modelo B. Generador 500 W. Caso 7

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo C (años)	Capacidad a los 30 años modelo C (Ah)
10	4	-
30	19	-
50	30	2,011927
70	30	2,143
90	30	2,173122
110	30	2,193297
130	30	2,207684
150	30	2,219194

Tabla 19. Modelo C. Generador 500 W. Caso 7

Capacidad Batería (Ah)	EOL modelo D (años)
10	3,3
30	5,3
50	9,66
70	15,88
90	22,24
110	29,86
130	37,72
150	44,95

Tabla 20. Modelo D. Generador 500 W. Caso 7

CASO 8. Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula con SOC = 20%

Para la realización de este caso se toma como base de estudio los casos números 5 y 6 expuestos previamente. En esos casos se habían hallado la mínima capacidad de batería que tenía una tasa de energía no servida nula para un consumo determinado.

El propósito de este caso es comprobar cómo influiría tanto en la vida útil de la batería como en la tasa de energía no servida el fijar como SOC mínimo el 20% en vez del 5% con el que se trabajaba antes.

SOC min	20%
Veces que no proporciona energía	179 (0,068% de los 30 años)
Ratio energía no servida	0,04%

Tabla 21. Energía no servida. Caso 8

Los resultados son interesantes ya que se puede apreciar que esta capacidad de batería es perfectamente asumible para una vivienda de este tipo al tener esa tasa de energía no servida que es prácticamente nula.

En cuanto a la esperanza de vida útil de la batería, el modelo A estima que, al cabo de los 30 años de estudio, la batería todavía tendría un 94.22% de capacidad respecto del BOL, dado que solamente habría perdido el 5,78% de su capacidad. Este porcentaje de vida útil remanente es 0,02% mayor que para el caso de SOC mínimo del 5%, lo cual puede considerarse despreciable. En cuanto a los modelos B y C estiman, también, que la batería durará más de 30 años, teniendo al final de los mismos aún una capacidad desde el BOL del 97%, ya que solamente habría perdido el 3% de la capacidad, lo que supone un 0,3% más de vida útil remanente que en caso de SOC mínimo del 5%. Mientras que el modelo D estima que la batería tendrá una vida útil de 81 años como en el caso 5, pero sensiblemente superior.

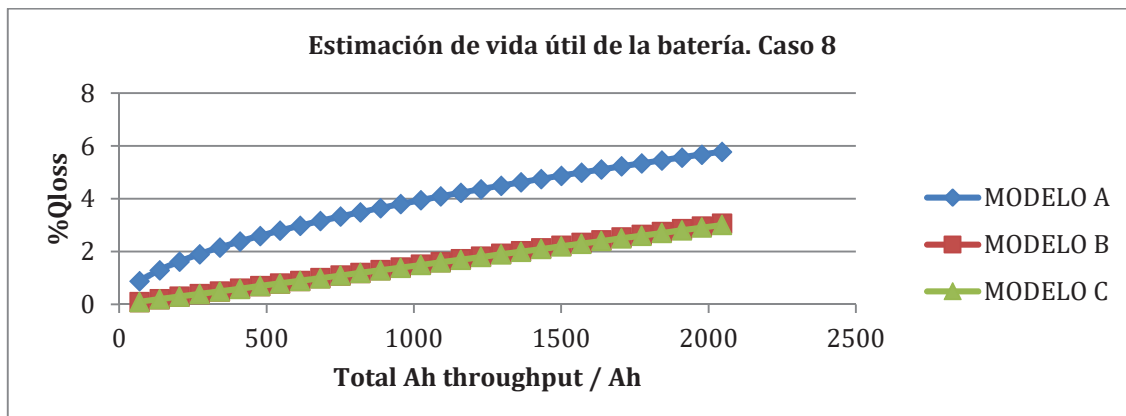


Figura 24. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 8

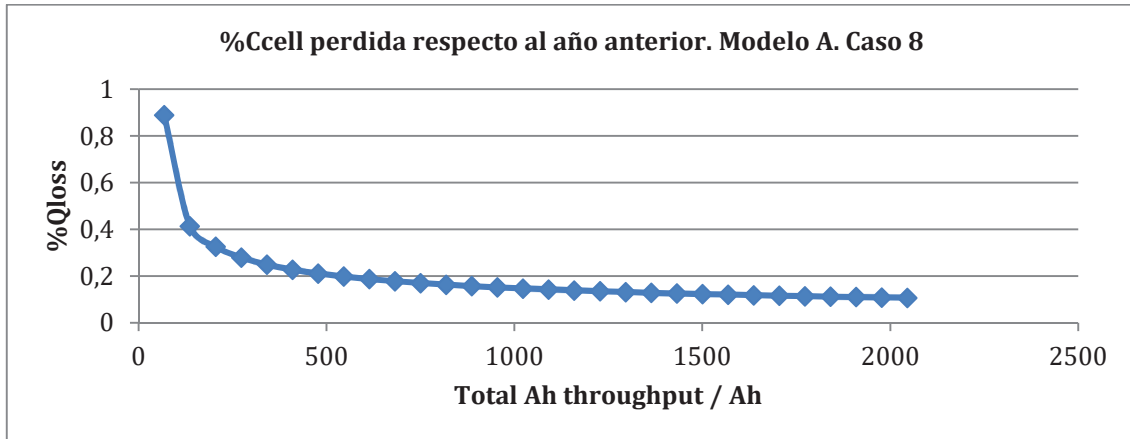


Figura 25. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 8

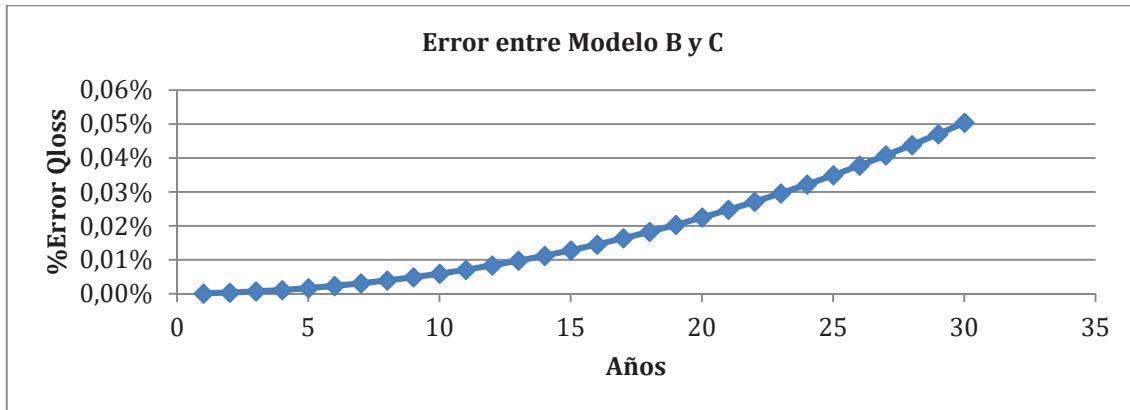


Figura 26. Error entre Modelo B y C. Caso 8

Del mismo modo que en casos anteriores se puede ver la clara tendencia lineal de los modelos B y C en cuanto a la estimación de vida útil, además del escaso error entre ellos.

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
25,71199939	81,61076099

Tabla 22. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 8

Por lo tanto, se puede concluir de este estudio que los modelos B, C y D muestran una ligera mejoría en cuanto a la estimación de la vida útil de la batería, que teniendo en cuenta que el estudio es a 30 años vista podría considerarse despreciable. En cambio, el modelo A no varía nada su estimación.

El motivo por el que apenas se varía la estimación en todos los modelos es debido a que la influencia del SOC mínimo es mayor para periodos de almacenaje de la batería. Es decir, de degradación por calendario, y no por ciclos como se ensaya en este caso.

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 11.

CASO 9. Batería mínima para dar una tasa de energía no servida nula con generación fotovoltaica de un aerogenerador

En este caso de estudio se ha decidido estudiar la influencia que tendría en las tasas de entrega de energía y en la estimación de la vida útil de la batería de 240Ah el cargar las baterías mediante aerogeneradores AIR X, los cuales son los más usados actualmente en España.

Su curva de generación de potencia según la velocidad del viento es la siguiente:



Figura 27. Curva de velocidad del viento - potencia (W) del aerogenerador AIR X (<http://www.aerogeneradores-air.com.ar/air-x.html>)

Dado que se tienen datos horarios de todo un año de la velocidad del viento, se ha podido estimar la generación fotovoltaica del aerogenerador. Para ello, se ha tomado esta gráfica a intervalos y se ha asociado un valor de vatios generado.

Se toman para la ecuación los valores de Y positivas.

X	Y
0	-50
3.4	-50
4.5	-25
6.8	25
9	100
11.3	250
13.5	450
15	500

Tabla 23. Puntos que definen la curva de la figura 27

Por lo tanto, se define que:

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/seg)	VALOR DE GENERACIÓN ASOCIADO (W)
< 5,65	0
5,65 < v < 7,5	25
7.5 < v < 9	50
9 < v < 11,3	150
11,3 < v < 12,4	250
12,4 < v < 15	450

Tabla 24. Tramos que definen la curva de la figura 27

Los resultados para este caso son bastante malos, ya que la tasa de energía no servida es bastante alta. Por lo tanto, esta instalación no podría funcionar ya que sería inadmisibles esta cantidad de energía no servida.

SOC min	5%
Horas que no proporciona energía	145605 (58,72% de los 30 años)
Ratio energía no servida	56,11%

Tabla 25. Energía no servida. Caso 9

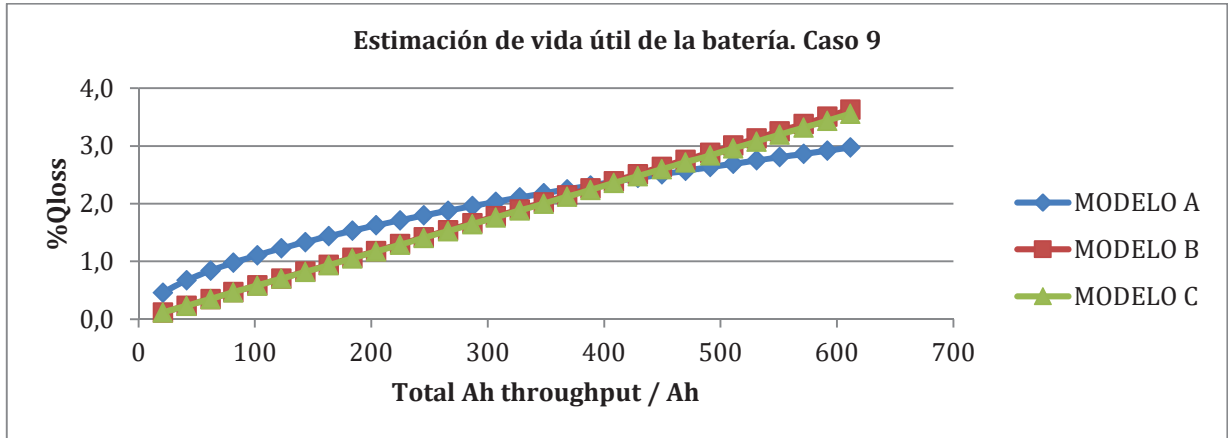


Figura 28. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 9

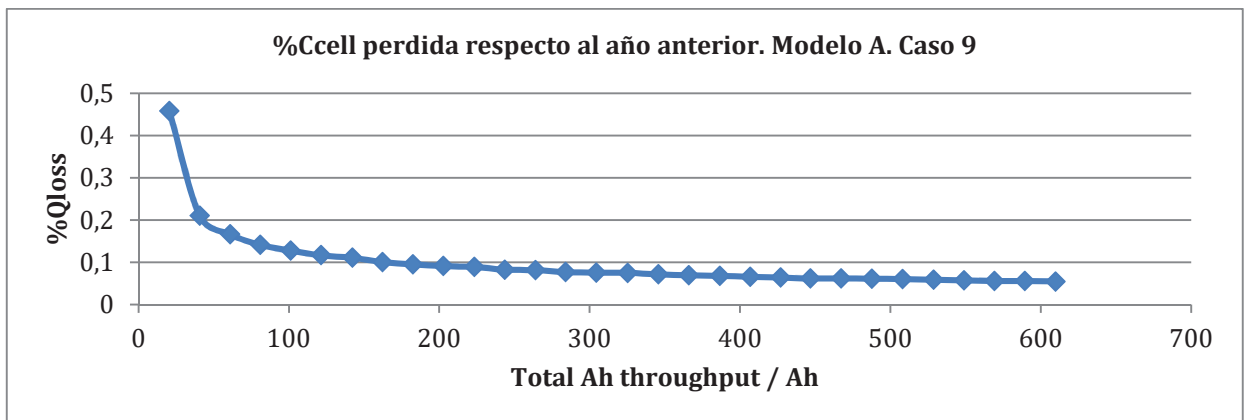


Figura 29. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 9

En cuanto a la estimación de la vida útil de la batería, el modelo A estima que solamente se ha perdido el 2,97% de la capacidad de la celda en el periodo de 30 años, mientras que los modelos B y C estiman que ese valor es de 3,63%.

Cabe destacar que esta baja degradación de la batería se debe al bajo número de ciclos que ha acumulado, puesto que la mayor parte del tiempo no ha dado servicio ya que la batería estaba descargada.

Además, el problema no radica en la capacidad de la batería como se ha dado en otros casos estudiados anteriormente, sino que esta vez el problema es la baja carga que proporciona un solo aerogenerador.

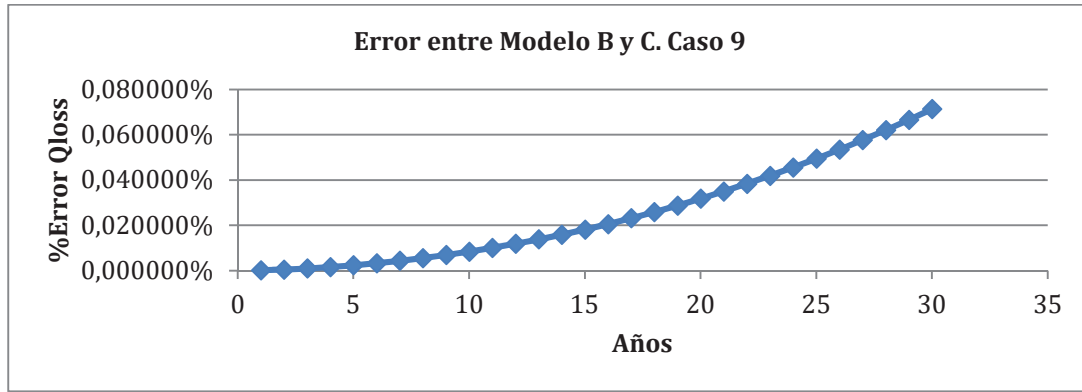


Figura 30. Error entre Modelo B y C. Caso 9

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
25,97150635	86,88939967

Tabla 26. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 9

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 12.

CASO 10: Número de aerogeneradores a colocar para dar una tasa de energía no servida nula con una batería mediana

Dada la altísima tasa de energía no servida del caso anterior en el que se disponía de un solo aerogenerador que daba potencia, se plantea la posibilidad de colocar varios aerogeneradores que proporcionen potencia. La batería usada es la batería de 240 Ah.

En primer lugar, se plantea el estudio de cuantos aerogeneradores colocar según la tasa de energía no servida y cuántas veces no se entrega energía.

Número de Aerogeneradores	Horas que no sirve energía	Energía no servida respecto del total
1	145605 (55,4% del tiempo)	56,11%
2	71467 (27,2% del tiempo)	27,05%
3	38700 (14,7% del tiempo)	14,15%
4	23430 (8,9% del tiempo)	8,37%
5	14280 (5,4% del tiempo)	5%
6	7560 (2,9% del tiempo)	2,82%
7	5070 (1,9% del tiempo)	1,88%
8	3840 (1,46% del tiempo)	1,34%

Tabla 27. Energía no servida según el número de aerogeneradores a colocar

A partir de esta tabla se decide que el número de aerogeneradores a colocar para tener una tasa de energía no servida razonable es de 6, dado que a partir de ese número la diferencia de colocar más no es muy apreciable, como se puede ver observar en los siguientes gráficos.

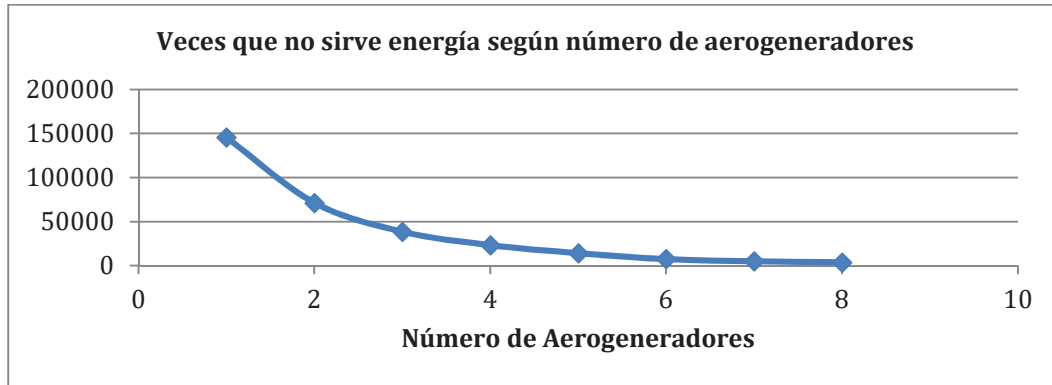


Figura 31. Veces que no sirve energía según el número de aerogeneradores instalados

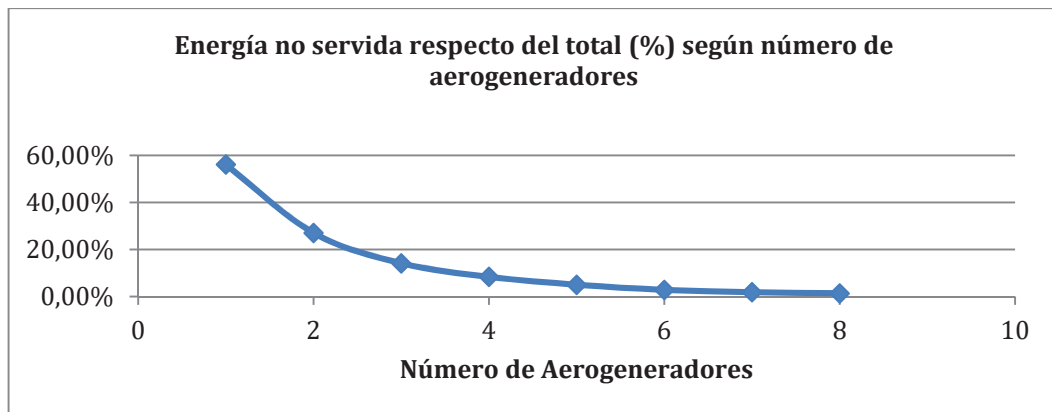


Figura 32. Energía no servida según el número de aerogeneradores instalados

Por lo tanto, se procede a estudiar para este caso la estimación de vida útil según los distintos modelos. Los resultados son que el modelo A estima que se tiene aún una capacidad respecto del BOL al final de los 30 años de un 94.33%, mientras que los modelos B y C, nuevamente, tienen un error mínimo entre ellos y su estimación es que al final de los 30 años la batería todavía dispone del 96,9%. Por otra parte, el modelo D estima una vida útil de la batería de, aproximadamente, 85 años.

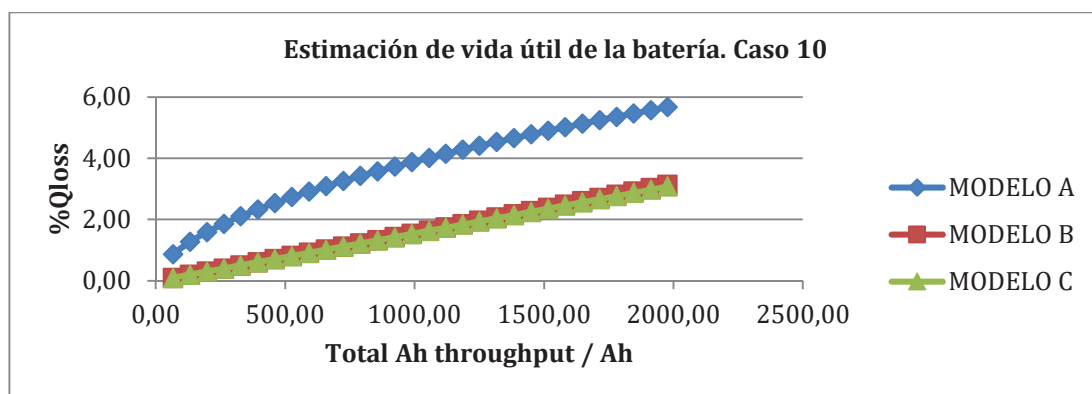


Figura 33. Estimación de la vida útil de la batería. Caso 10

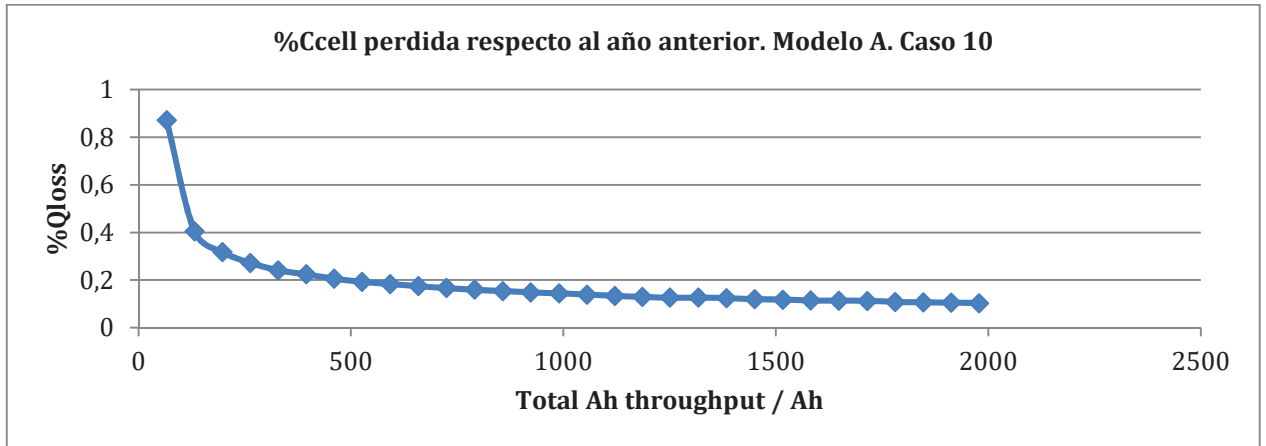


Figura 34. %Ccell perdida respecto al año anterior. Modelo A. Caso 10

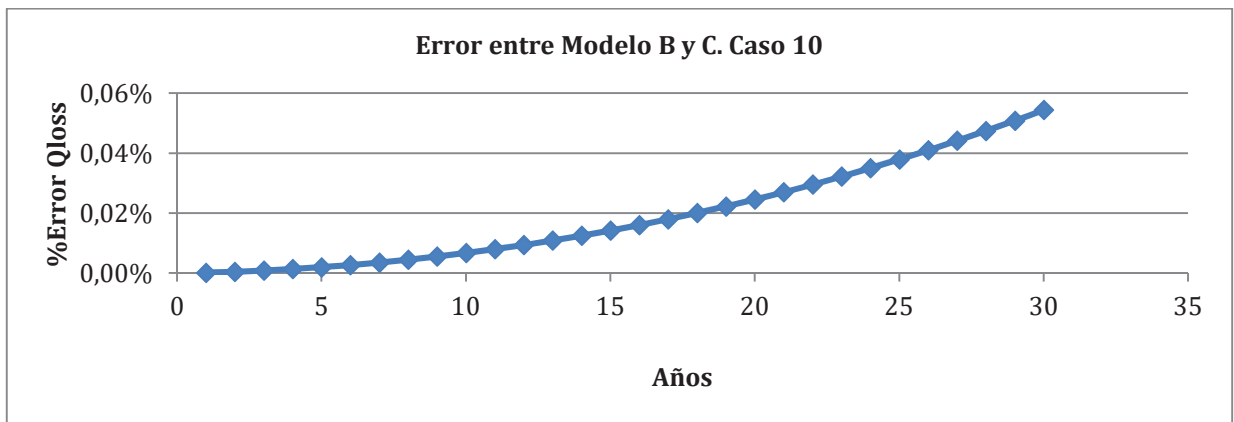


Figura 35. Error entre Modelo B y C. Caso 10

CARGA QUE PUEDE CICLAR UNA BATERÍA (kAh) QEOL	
kAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
25,90562186	85,50349449

Tabla 28. Carga que puede ciclar una batería hasta fin de vida. Caso 10

Los resultados relacionados con este caso están más ampliamente detallados en el anexo 13.

COMPARACIÓN CASOS DE ESTUDIO

Una vez concluidos todos los casos de estudio realizados, se ha creído conveniente realizar una comparativa entre los diferentes casos para cada modelo utilizado.

Observando las figuras representadas a continuación, se puede observar para cada modelo que los casos 1 y 2 tienen bastante más degradación que el resto, ya que se trata de los casos de baterías pequeñas.

En cuanto al resto de casos no hay tanta variación ya que al cabo de los 30 años de estudio hay una variación final del porcentaje de capacidad perdida muy pequeño.

MODELO A

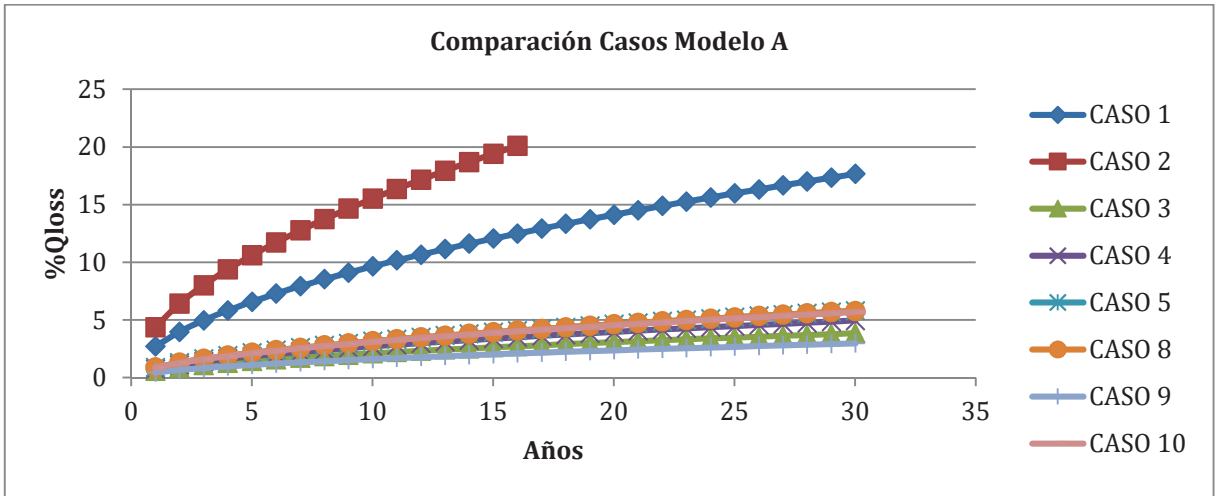


Figura 36. Comparación Casos Modelo A

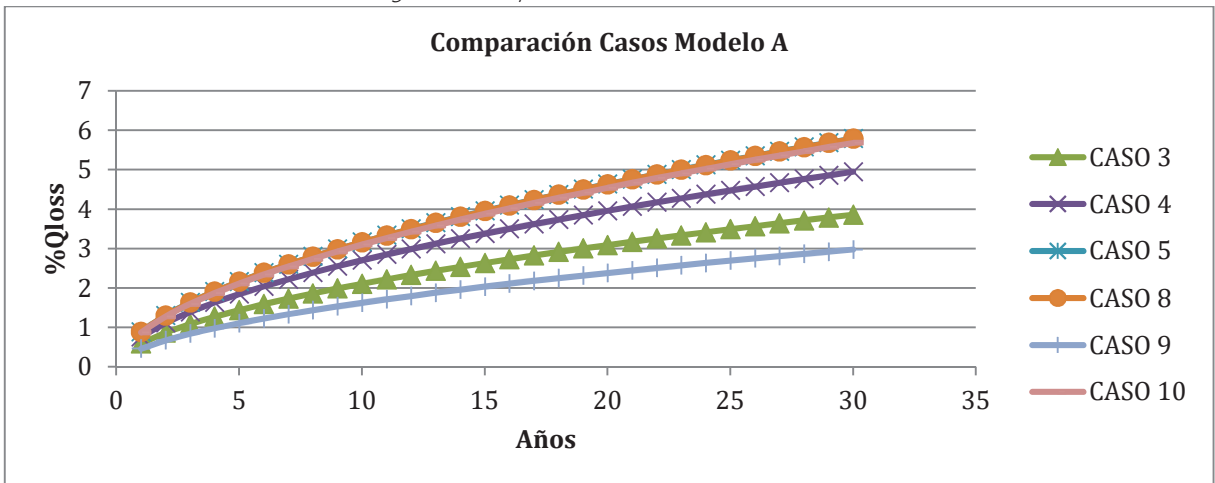


Figura 37. Comparación Casos Modelo A (omitiendo caso 1 y 2)

MODELO B

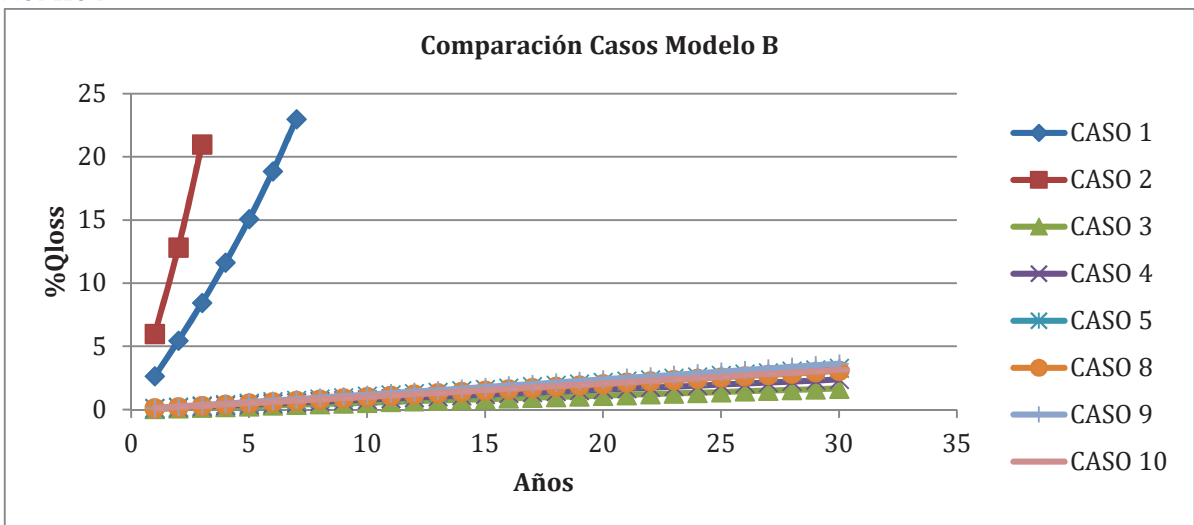


Figura 38. Comparación Casos Modelo B

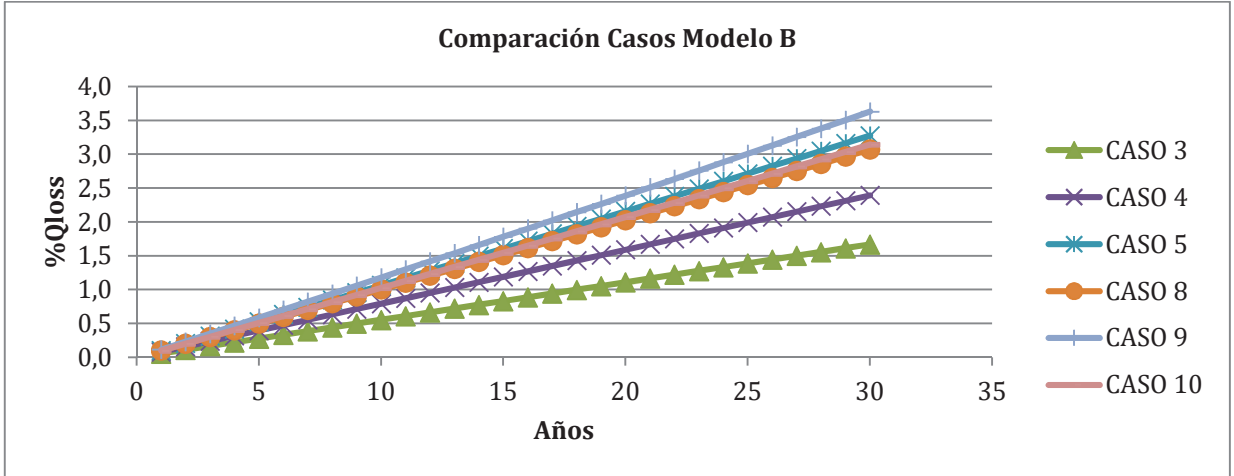


Figura 39. Comparación Casos Modelo B (omitiendo caso 1 y 2)

MODELO C

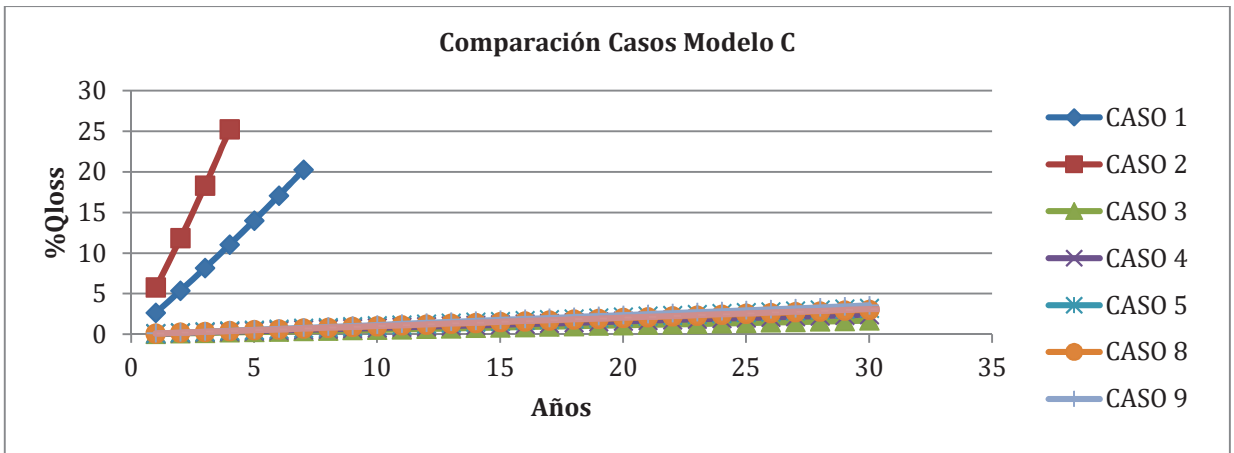


Figura 40. Comparación Casos Modelo C

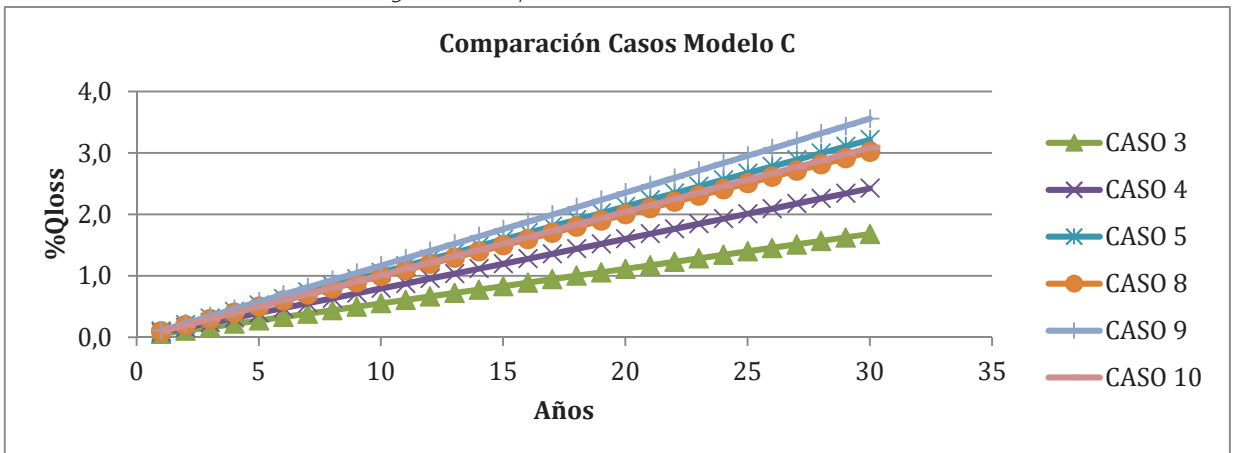


Figura 41. Comparación Casos Modelo C (omitiendo caso 1 y 2)

MODELO A	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 8	CASO 9	CASO 10
% Capacidad perdida al cabo de 30 años	3,86009338	4,94901375	5,79302809	5,78871745	2,97457012	5,68210089
Orden	2	3	6	5	1	4

Tabla 28. Esperanza de vida Modelo A para los distintos casos

MODELO B	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 8	CASO 9	CASO 10
% Capacidad perdida al cabo de 30 años	1,669432	2,395051	3,275774	3,071586	3,630716	3,143334
Orden	1	2	5	3	6	4

Tabla 29. Esperanza de vida Modelo B para los distintos casos

MODELO C	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 8	CASO 9	CASO 10
% Capacidad perdida al cabo de 30 años	1,684533	2,426423	3,218246	3,021151	3,559275	3,088859
Orden	1	2	5	3	6	4

Tabla 30. Esperanza de vida Modelo C para los distintos casos

CONCLUSIONES

Como conclusiones de este trabajo se pueden extraer:

- 1.- La implantación de una batería pequeña como la de los casos 1 y 2 no podría ser posible para este tipo de consumo, ya que además de que tienen bastante más degradación que el resto (dado que se trata de baterías muy pequeñas), dan una tasa de energía no servida muy alta, y en el caso de que se coloque un generador diésel de apoyo, es este el que proporciona energía la mayor parte del tiempo, lo que le hace ser un sistema muy ineficiente.
- 2.- El modelo B y C, dado que provienen de la misma tesis doctoral, proporcionan casi el mismo resultado. Por lo tanto, se puede concluir que da igual realizar la iteración del cálculo de capacidad de la batería de forma horaria o anual para el modelo extraído de la tesis doctoral.
- 3.- Los modelos B y C son más optimistas que el modelo A en cuanto a la estimación de la vida útil de la batería en periodos largos de tiempo, ya que el porcentaje de capacidad perdida estimada del modelo B y C varía entre 1,6 y 3,6% del BOL, mientras que en el caso del modelo A esta estimación varía entre 3,8 y 5,7 % del BOL.

BIBLIOGRAFÍA

- Barré, A. Deguilhem, B. Grolleau, S. Gérard, M. Suard, F. Riu, D. (2013) A review on lithium- ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, (241), 680-689.
- Dufo López, R. Software iHOGA. <http://personal.unizar.es/rdufo/index.php?lang=es>
- Groot J. (2014) State-of -Health Estimation of Li-ion Batteries: Ageing Models (Tesis doctoral) Chalmers University of Technology, Suecia.
- Groot, J. Swierczynski, M. Stan, A.I. , Kaer, S.K. (2015) On the complex ageing characteristics of high-power LiFePO₄/graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents. *Journal of Power Sources*. (286) 475- 487
- Wang, J. Liu, P, Hicks-Garner, J. Sherman, E. Soukiazian, S. Verbrugge, M. Tataria, H. Musser, J. Finamore, P. (2011) Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. *Journal of Power Sources* (196), 3942- 3948

ANEXOS

ANEXO 1: Resumen artículo "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications" (Barré, A. et al. 2013)

Las baterías de ión de litio llevan siendo comercializadas desde 1991, inicialmente fueron usadas tanto en teléfonos móviles como en ordenadores, pero el creciente interés en esta tecnología ha resultado en una mejora del rendimiento de estas, proporcionando que esta tecnología pueda ser aplicable al mercado de los coches híbridos y eléctricos, unido todo a su bajo peso respecto de las baterías de ión de plomo.

Inicialmente, las baterías de ión de litio no tenían necesidad de tener un gran tiempo de vida útil, pero con las nuevas aplicaciones, el interés está ahora enfocado al fenómeno de su envejecimiento debido a los requerimientos de los fabricantes. En cuanto al diseño de las baterías se refiere, el objetivo es proporcionar una vida útil de 10-15 años o de 20.000-30.000 descargas. Por lo tanto, el efecto de envejecimiento de las baterías va directamente relacionado con el tiempo y uso de las mismas.

Identificar los mecanismos de envejecimiento y degradación claves de la batería es un objetivo sumamente complicado, dado que muchos aspectos del medio ambiente o del modo de uso pueden generar distintas formas de degradación de estas. Por lo tanto, la pérdida de capacidad y el aumento de resistencia no dependen de las mismas variables, lo que hace del fenómeno de envejecimiento de las baterías una tarea difícil de entender.

Envejecimiento electroquímico

El envejecimiento, inicialmente, tiene lugar en la composición química del electrodo de la batería, pero los mecanismos de degradación del electrodo positivo y negativo son diferentes.

Efectos del envejecimiento en el electrodo negativo

La mayoría de los electrodos negativos están compuestos de grafito, carbón, óxidos de titanio o silicón. La elección del material es muy importante en los fenómenos de envejecimiento y seguridad de la batería.

Para el caso de un electrodo negativo de grafito, el mayor efecto de envejecimiento con el tiempo es el desarrollo de una capa sólida en la interfaz entre electrolito y electrodo llamada "Solid Electrolyte Interphase (SEI)".

Esta capa sólida es creada naturalmente durante la primera carga, y su función es la de proteger al electrodo negativo de posibles corrosiones, y al electrolito de reducciones, aportando a la batería una mayor seguridad durante la carga.

El SEI va creciendo a lo largo del tiempo, lo que induce una pérdida de iones de litio y una descomposición del electrolito. Además, la pérdida de iones de litio en el electrodo negativo de grafito ha sido demostrada como la mayor causa de envejecimiento durante largos periodos de almacenamiento, por lo que se puede decir que el SEI es estable y no supone una pérdida significativa de capacidad en un periodo corto de tiempo.

Sin embargo, un SOC (State of charge) mayor del 80% puede provocar una aceleración de este fenómeno, además de unas condiciones inadecuadas como, por ejemplo: altas temperaturas, sobrecarga, cortocircuito, etc.

Efectos del envejecimiento en el electrodo positivo

Para el caso del electrodo positivo no se ve una modificación evidente de la morfología del electrodo positivo, para todos los niveles de utilización de la batería, lo que pone de manifiesto la importancia primordial del electrodo negativo en el fenómeno de envejecimiento.

Sin embargo, el electrodo positivo es susceptible de una pequeña alteración con el paso del tiempo, dependiendo del material seleccionado para su fabricación. Esto es debido a la creación de una SEI que es más difícil de detectar, dados los altos voltajes en este electrodo.

Además, de igual modo que para el electrodo negativo, el envejecimiento del electrodo positivo depende fuertemente del SOC y la temperatura.

Consecuencias del fenómeno de envejecimiento

Se pueden diferenciar dos efectos principales del envejecimiento de las baterías: pérdida de capacidad y aumento de la impedancia. Ambos fenómenos difieren por causas químicas, dado que tienen diferentes orígenes, lo que da lugar a una dependencia no lineal de estos impactos de envejecimiento.

La pérdida de rendimiento es causada por diferentes mecanismos que dependen del material del electrodo, y va asociada con una pérdida de autonomía de la batería. Las consecuencias de estos mecanismos en las celdas de ión de litio son:

- *Pérdida de litio ciclable*: Reduce el equilibrio de la celda, y está relacionada con reacciones secundarias. Puede ocurrir en ambos electrodos.
- *Pérdida de materiales activos del electrodo*: Generado por una disolución del material, degradación estructural.
- *Aumento de resistencia de la celda*: Puede ocurrir debido a películas pasivas sobre la superficie activa de las partículas.

Un cuanto al rendimiento de las baterías, tanto la pérdida de litio ciclable como la pérdida de materiales activos del electrodo dan lugar a una pérdida de capacidad de la batería. En cambio, el aumento de la impedancia es generado por las películas pasivas.

Orígenes del envejecimiento

El envejecimiento de la batería puede ser desasociado en dos partes: Envejecimiento por calendario y por ciclos. Ambos términos vienen causados por diferentes usos de la batería.

Envejecimiento por calendario

Este tipo de envejecimiento corresponde al fenómeno de almacenamiento de baterías, y es la proporción irreversible de pérdida de capacidad durante el almacenaje. Las corrientes de descarga varían mucho dependiendo de las condiciones de almacenaje, por lo que los efectos de envejecimiento acaecidos en la batería pueden ser acelerados o decelerados según los mismos.

El principal efecto de este tipo de envejecimiento es la temperatura de almacenamiento. Cuando la temperatura es alta, reacciones secundarias como la corrosión son facilitadas y la pérdida de litio es mayor que con temperaturas no tan altas, lo que lleva a una pérdida de capacidad. Las bajas temperaturas, por el contrario, dan problemas debido a la pérdida de material de difusión y alteran la composición química de la batería.

La otra principal variable que afecta a este tipo de envejecimiento es el SOC durante el almacenaje, dado que para un mayor SOC los niveles de degradación son mayores. Por definición, el SOC representa la proporción de iones presente en los electrodos.

Envejecimiento por ciclos

Este tipo de envejecimiento está asociado con el impacto de los periodos de utilización de baterías, llamados ciclos (carga-descarga). Es una consecuencia directa del SOC, el modo de utilización, la temperatura y lo solicitada que esté la batería.

Un recurso recurrente en la literatura suele ser el Δ SOC, que representa la variación de SOC durante el periodo de carga o descarga. Esto es un aspecto importante que considera la cantidad de energía que entra o sale a la batería en una carga o descarga respectivamente.

Otro aspecto a tener en cuenta es el voltaje al que es sometida la batería durante los ciclos de carga-descarga. Altos voltajes de carga implican una aceleración del fenómeno de envejecimiento.

Este tipo de envejecimiento es más complejo de predecir ya que tiene en cuenta más variables independientes que están relacionadas con condiciones externas, así como con la utilización de la batería. Los principales factores considerados son la temperatura, el número de ciclos, el Δ SOC y el voltaje, aunque generalmente la mayoría de estudios utilizan el número de ciclos como el principal aspecto a considerar.

Estimación de vida útil

Para evaluar el envejecimiento, se ha creado el indicador de "State of Health (SOH)", que estima la capacidad de la batería en un momento determinado respecto del momento inicial.

$$SOH(t) = \frac{\text{nominal capacity at } t}{\text{initial capacity}} (\%)$$

ANEXO 2: Resumen artículo "Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells" (Wang, J, et al, 2011)

Este estudio tiene como objeto estimar el tiempo de vida hasta el EOL ("End of life") mediante un test de vida acelerado, por lo que fueron estudiadas 26.650 celdas de ión de litio de 2,2 Ah de LiFePO₄ cátodo y ánodo de carbón.

Diversos estudios fueron realizados sobre ellas en variadas condiciones de temperatura (-30°C, 0°C, 15°C, 25°C, 45°C, 60°C), DOD ("Depth of Discharge") (90%, 80%, 50%, 20%, 10%), y C-rate (ratios de descarga) (C/2, 2C, 6C, 10C). A la hora de definir el DOD y el C-rate, se supuso una batería de 2 Ah.

DOD (%)	Temperature °C										C-rate			
	-30	0	15	25	45	60								
90	1	1	2242	2240	3144	2130			1796	1661	754	518	C/2	
80	1	1	2520	2620	2390		2490	903	2120	2123	1011	1006		
50	13	15	3976	3965	3827	3804			3387	3317	3356	3963		
20	2662	4979	9626	9662	9234		4711		2211	8374	8379	9801		9821
10	9678	12092	18679	18534	18067	17940			16235	16574	19098	19386		
	-30	0	15	25	45	60					2C			
90	26	40							4492	4048		1276	1594	
80			2249	1931										
50			2315	2197										
10					3532	3671								
	-30	0	15	25	45	60					6C			
90			3795	1207	700	1222								
80			1723	409	480	418								
50	1114	641			4017	8242			1479	1355				
10					5887	8290						1428	1854	
	-30	0	15	25	45	60					10C			
90	56	1										274	228	
80			611	1135					683	691				
50			1076	1304										
10	1	1			9648	6696								
	-30	0	15	25	45	60								
90											17511	16848		

Fig. 1. Test matrix for accelerated cycle life study. Two cells were tested at each condition. The numbers in the test matrix indicate the number of cycles attained by the cell. Cells highlighted in green were still cycling when this manuscript was written, and cells highlighted in red have reached the defined end of life condition. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of the article.)

Figura 1. Test matrix for accelerated cycle life study. Fuente: J. Wang et al.

La figura 1 representa el número de ciclos que han sido hechos en cada una de las condiciones. Las celdas que se encuentran en rojo ya han llegado a su EOL, mientras que las que se encuentran en verde estaban todavía siendo testadas en el momento de redacción de la tesis.

Resultados y Discusión

Muchas de las celdas testadas a altos C-rate han llegado a su EOL, como se puede observar en la figura 1, por lo que una conclusión es que la pérdida de capacidad se ve acelerada cuando el C-rate es grande en comparación con el caso de C/2.

Además, las celdas testadas en temperaturas extremas también responden muy pobremente, por lo que se puede concluir que las dichas temperaturas no ayudan a una alta vida útil de la batería.

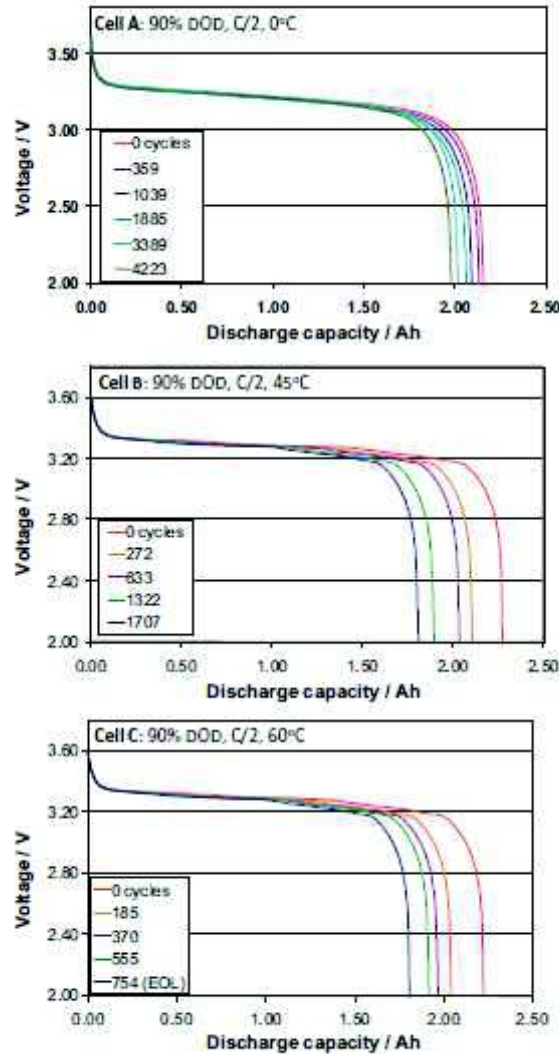


Fig. 2. Discharge curves of the battery cells cycled at three different conditions: (Cell A) 90% DOD, C/2, 0 °C; (Cell B) 90% DOD, C/2, 45 °C; and (Cell C) 90% DOD, C/2, 60 °C.

Figura 2: Discharged curves of the battery cells cycled at three different conditions. Fuente: J. Wang et al.

En la figura 2 se puede observar como las altas temperaturas afectan negativamente a la vida de la batería. Para un mismo DOD del 90% y una C-rate de C/2, se estudia la influencia de la temperatura para el caso de 0°C, 45°C y 60°C. El resultado es claro. Conforme aumenta la temperatura, para menores números de ciclos hay más diferencia respecto de la capacidad inicial de la batería que para el caso testado a 0°C.

Efectos del DOD y la temperatura

Para un C-rate dado, aquellas celdas cicladas a un DOD > 50% llegaban antes al EOL que aquellas con DOD < 50%. Esta observación es ilustrada en la figura 3, donde la retención de la capacidad es dibujada como función del número de ciclos, y dependiente del DOD. Para este caso se testea a una temperatura de 60°C y un C-rate de C/2.

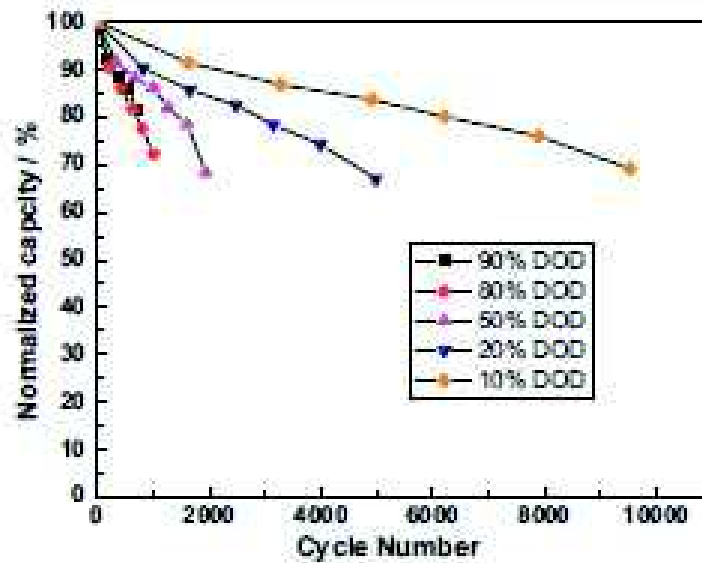


Fig. 3. Capacity retention at 60°C and a discharge rate of C/2 plotted as a function of cycle number, data shown for 90(■), 80(●), 50(▲), 20(▼), and 10(◆) % DOD.

Figura 3: Capacidad retención al 60° C and a discharge rate of C/2 plotted as a function of cycle number.
Fuente: J. Wang et al.

En la figura 4 se puede observar el mismo estudio, pero relacionado con el número de días de vida de la batería, y no con el DOD.

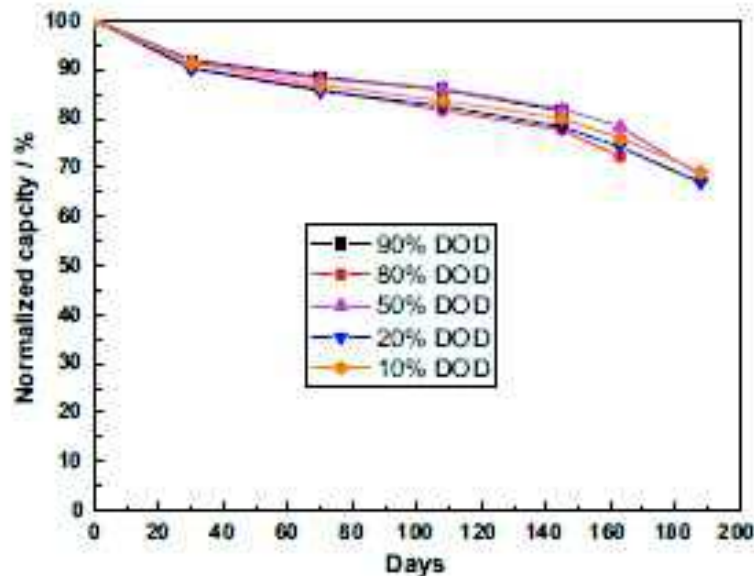


Fig. 4. Capacity retention at 60°C and a discharge rate of C/2 plotted as a function of time (days), data shown for 90(■), 80(●), 50(▲), 20(▼), and 10(◆) % DOD.

Figura 4: Capacidad retención al 60° C and a discharge rate of C/2 plotted as a function of time (days).
Fuente: J. Wang et al.

Ecuación Qloss

Finalmente, se halla la ecuación para estimar la pérdida de capacidad de la batería, que queda de la forma expresada a continuación, donde el coeficiente que acompaña a dicha ecuación varía no linealmente según el C-rate que se esté aplicando a la batería.

$$Q_{\text{loss}} = 30,330 \exp\left(\frac{-31,500}{8.314T}\right) A_h^{0.552}$$

Table 1
Equation to predict capacity fade at a given discharge rate.

C-rates	Life model
C/2	$Q_{\text{loss}} = 30,330 \cdot \exp(-31,500/RT) \cdot (A_h)^{0.552}$
2C	$Q_{\text{loss}} = 19,300 \cdot \exp(-31,000/RT) \cdot (A_h)^{0.554}$
6C	$Q_{\text{loss}} = 12,000 \cdot \exp(-29,500/RT) \cdot (A_h)^{0.56}$
10C	$Q_{\text{loss}} = 11,500 \cdot \exp(-28,000/RT) \cdot (A_h)^{0.56}$

Tabla 1: Equation to predict capacity fade at a given discharge rate. Fuente: J. Wang et al.

En la figura 7 se observa el buen ajuste de la ecuación para el caso de C-rate de C/2 con los valores experimentales que se han obtenido, siendo mejor el ajuste en el caso de 15°C y 45°C.

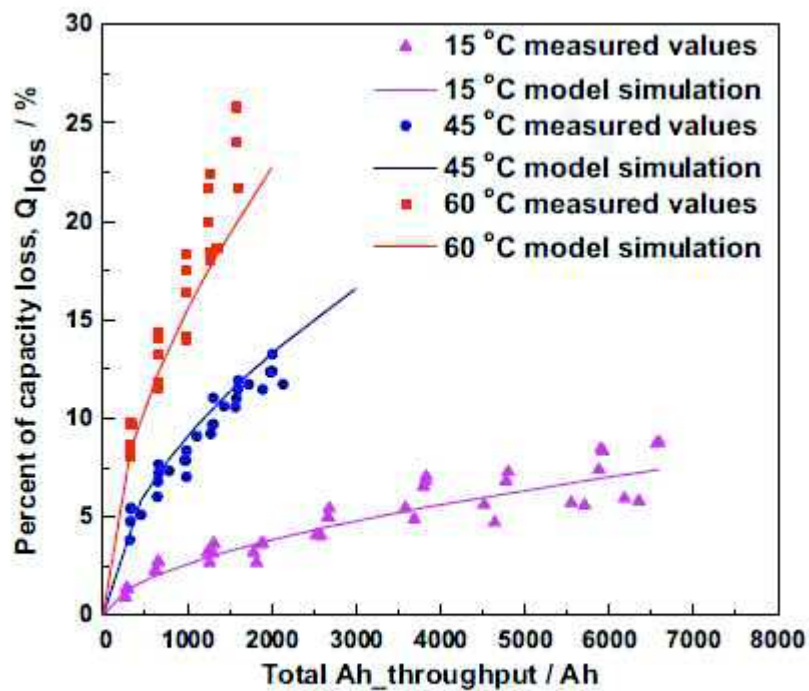


Fig. 7. Simulation of cycle-life prediction model (line) and experimental data (dots) at 15(▲), 45(◆), 60(■) °C and a C/2 discharge rate. (Data from each experimental DOD is included).

Figura 7: Simulación de cycle-life prediction model (line) and experimental data (dots).
Fuente: J. Wang et al.

Finalmente, dado que esta ecuación no ajustaba tan bien para C-rate mayores de C/2, se decidió optar por otra ecuación universal que sí se ajustaba para todos los casos, aunque seguía teniendo un coeficiente diferente según el C-rate.

$$Q_{\text{loss}} = B \cdot \exp\left[\frac{-31700 + 370.3 \times \text{C_Rate}}{RT}\right] (A_h)^{0.55}$$

Table 3
Generalized life model for all C-rates.

$$Q_{\text{loss}} = B \cdot \exp[-31,700 + 370,3 \times C_{\text{Rate}}/RT] (A_h)^{0.55}$$

$$A_h = \text{cycle_number} \times \text{DOD} \times 2$$

C-rate	C/2	2C	6C	10C
A values	31,630	21,681	12,934	15,512

Tabla 3: Generalized life model for all C-rates. Fuente: J. Wang et al.

En la figura 8 se puede observar el buen ajuste de esta ecuación para los casos de C-rate > C/2.

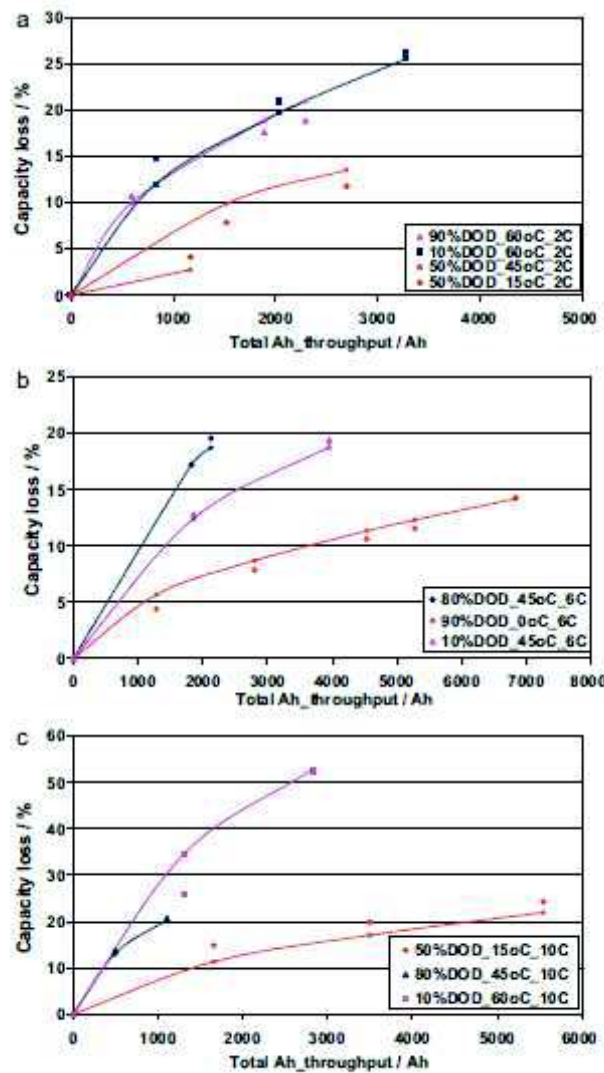


Fig. 8. Model simulation results (lines) and experimental results (dots) at 2C (a), 6C (b) and 10C (c) discharge rates.

Figura 8: Model simulation results (lines) and experimental results (dots) at 2C (a), 6C (b) and 10C (c) discharge rates. Fuente: J. Wang et al.

ANEXO 3: Resumen artículo "On the complex ageing characteristics of high-power LiFePO₄/graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents" (Groot, J. et al., 2015)

Se observa que para realizar la estimación de la vida de la celda no solo se debe tener en cuenta la carga y descarga a una determinada C-rate, la temperatura y el DOD, sino que también está fuertemente influenciada por las pausas entre cargas o descargas.

Consecuentemente, es tarea difícil el encontrar una relación empírica para la estimación de la vida de la batería válida para todos los casos de estudio.

$$Q_{EOL} [kAh] = \left(a \cdot e^{b \cdot T} \cdot T^{c \cdot I^2 + d \cdot I + e} \right) + f$$

$a = 3.11$
 $b = 2.81$
 $c = 0.0414$
 $d = -1.12$
 $e = 0.687$
 $f = 3.32$

Esta ecuación que estima la vida útil de la batería en kAh que puede ciclar la batería, se probó que era suficientemente válida para ciclos simétricos de DOD = 100% en el rango estudiado de temperaturas.

En contraste, esta relación no puede ser usada cuando los ciclos de carga-descarga son asimétricos.

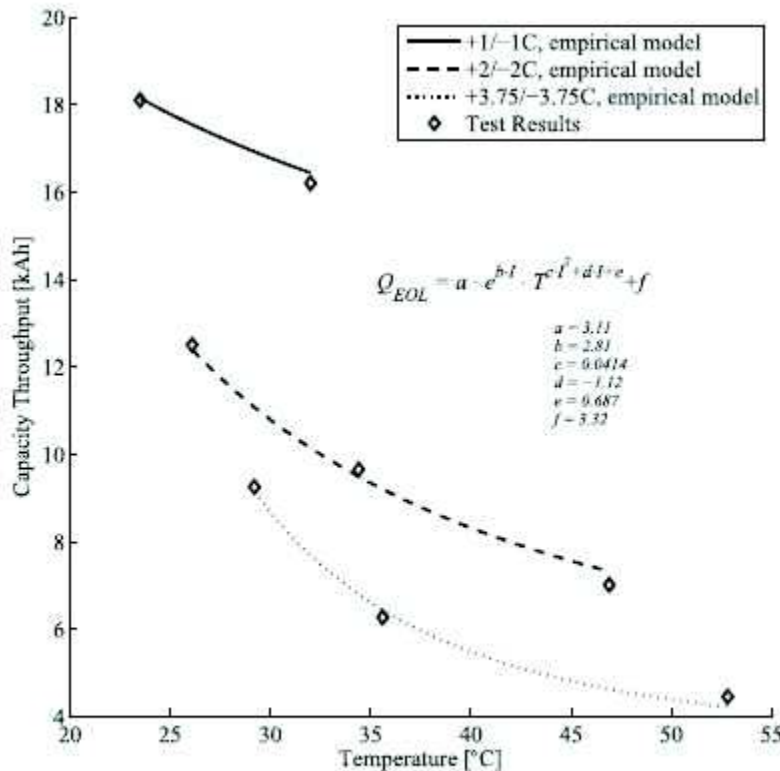


Fig. 22. Cycle life of the LiFePO₄/graphite cells for symmetric cycles at 1, 2 and 4C-rate and the fitted empirical cycle life relation as a function of temperature and current rate (EOL = 20% capacity fade).

Figura 22: Cycle life of the LiFePO₄/graphite cells for symmetric cycles al 1,2 and 4C- rates and the fitted empirical cycle life relation as a function of temperature and current rate. .Fuente: J. Groot et al.

La figura 22 representa la cantidad de intensidad en kAh que puede ciclar la batería según la temperatura, la cual va disminuyendo cuanto más caluroso sea el ambiente. Además, hay tres zonas claramente diferenciadas que son las funciones de carga/descarga de C-rate iguales a C, 2C, 3.75C. Se puede ver que estas ecuaciones se ajustan bastante bien a los resultados experimentales obtenidos.

ANEXO 4: Resumen Tesis Doctoral "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Ageing Models" (Groot, J. 2014)

Esta tesis doctoral se basa en el estudio de la vida de la batería mediante la división en varias partes de menor número de simulaciones donde el ratio de degradación es conocido. La estimada degradación, tanto de la celda como del ánodo, después de un cierto número de ciclos, es usada para reinicializar el modelo y estimar una nueva tasa de degradación, como se puede observar en la figura 5.8.

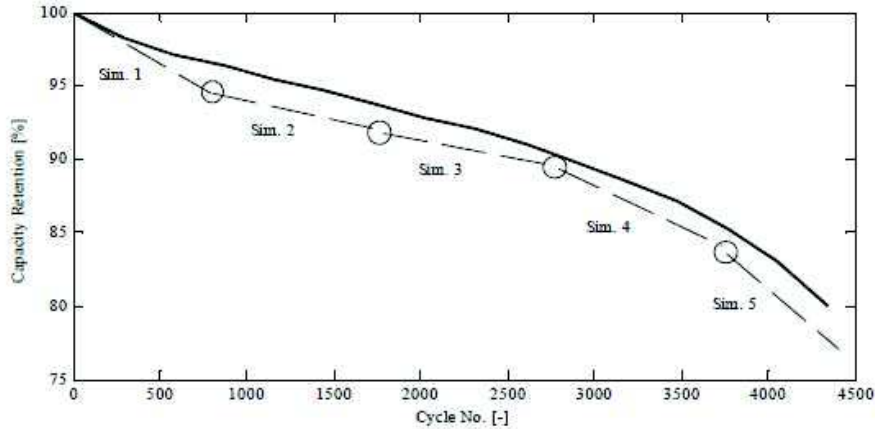


Figure 5.8 Schematic representation of a step-wise method for simulation a complete cycle life test based on five steps. Circles mark re-initialisation and start of simulation.

Figura 5.8: Schematic representation of a step- wise method for simulation a complete cycle life test based on five steps. Fuente: J. Groot

El modelo general de envejecimiento está basado en la función de pérdida de capacidad acumulativa

$$C = C_{BOL} \cdot (1 - K_{Loss,A/L})^{CT}$$

C: capacidad de celda / ánodo

C_{BOL}: capacidad de celda / ánodo en el BOL ("Beggining of life")

K_{Loss,A/L}: LAAM (loss of anode material)/ Cyclable lithium loss por capacidad completa

CT: rendimiento capacidad total

Para hallar ese factor por el que se va reduciendo la capacidad de la batería cada ciclo, se utiliza la ecuación:

$$K_{Loss,A/L} = K_{TI,A/L} \cdot K_{SOC,A/L} \cdot K_{CT} \cdot K_{SOH,A/Cell}$$

Donde para el cálculo de los diferentes parámetros se debe tener en cuenta diferentes variables de estudio.

$$K_{TI,A/L} = f(T, I)$$

$$K_{SOC,A/L} = f(SOC, SOD),$$

$$K_{SOH,A/Cell} = f(SOH_{A/Cell})$$

$$K_{CT} = f(Capacity\ throughput)$$

En primer lugar, se encuentra K_{TI,A/L}, el cual se calcula de la forma:

$$K_{TI,A/L} = k_{1,A/L} + k_{2,A/L} \cdot T + k_{3,A/L} \cdot I + k_{4,A/L} \cdot T^2 + k_{5,A/L} \cdot T \cdot I + k_{6,A/L} \cdot I^2$$

Siendo los coeficientes los indicados en la tabla 7, según se calcule teniendo en cuenta la pérdida de capacidad de la celda, o del ánodo.

Table 7 Ageing function coefficients obtained through fitting

Parameter	Value	Unit	Ageing Function	Cycles used for parameterisation
$k_{1,A}$	$4.78 \cdot 10^{-3}$	-	$K_{II,A}$: current rate / T ageing function for LAAM	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{2,A}$	$-3.14 \cdot 10^{-6}$	$^{\circ}C^{-1}$	$K_{II,A}$: current rate / T ageing function for LAAM	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{3,A}$	$-1.55 \cdot 10^{-3}$	A^{-1}	$K_{II,A}$: current rate / T ageing function for LAAM	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{4,A}$	$5.58 \cdot 10^{-8}$	$^{\circ}C^{-2}$	$K_{II,A}$: current rate / T ageing function for LAAM	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{5,A}$	$8.65 \cdot 10^{-7}$	$[^{\circ}CA]^{-1}$	$K_{II,A}$: current rate / T ageing function for LAAM	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{6,A}$	$4.86 \cdot 10^{-7}$	A^{-2}	$K_{II,A}$: current rate / T ageing function for LAAM	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{1,L}$	$3.40 \cdot 10^{-5}$	-	$K_{III,L}$: current rate / T ageing function for Li loss	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{2,L}$	$-3.31 \cdot 10^{-7}$	$^{\circ}C^{-1}$	$K_{III,L}$: current rate / T ageing function for Li loss	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{3,L}$	$-2.53 \cdot 10^{-3}$	A^{-1}	$K_{III,L}$: current rate / T ageing function for Li loss	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{4,L}$	$-3.45 \cdot 10^{-9}$	$^{\circ}C^{-2}$	$K_{III,L}$: current rate / T ageing function for Li loss	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{5,L}$	$9.85 \cdot 10^{-7}$	$[^{\circ}CA]^{-1}$	$K_{III,L}$: current rate / T ageing function for Li loss	M, N & C at +23.5...+53 °C
$k_{6,L}$	$2.06 \cdot 10^{-6}$	A^{-2}	$K_{III,L}$: current rate / T ageing function for Li loss	M, N & C at +23.5...+53 °C
k_7	17.4	-	$K_{SOC,A}$: SOC region scale factor for anode loss	D, K & L at approx. +30 °C
k_8	20.7	SOT^{-1}	$K_{SOC,A}$: SOC region scale factor for anode loss	D, K & L at approx. +30 °C
k_9	0.206	-	$K_{SOC,A}$: SOC region scale factor for anode loss	D, K & L at approx. +30 °C
k_{10}	10.8	-	$K_{SOC,L}$: SOC region scale factor for lithium loss	D, K & L at approx. +30 °C
k_{11}	14.7	SOC^{-1}	$K_{SOC,L}$: SOC region scale factor for lithium loss	D, K & L at approx. +30 °C
k_{12}	$1.35 \cdot 10^{-3}$	-	$K_{SOC,L}$: SOC region scale factor for lithium loss	D, K & L at approx. +30 °C
k_{13}	-6.37	SOC^{-1}	$K_{SOC,L}$: SOC region scale factor for lithium loss	D, K & L at approx. +30 °C
k_{14}	0.141	-	$K_{SOC,L}$: SOC region scale factor for lithium loss	D, K & L at approx. +30 °C

En las figuras 5.9 y 5.10 se puede observar el incremento del valor del parámetro K_{Ti} , lo que conlleva aumento de pérdida de capacidad, a medida que se aumenta la temperatura, tanto para el caso de estudio del ánodo, como para el de la celda respectivamente.

Además, también se puede ver una fuerte relación entre el aumento del C-rate y la pérdida de capacidad tanto del ánodo como de la celda. Para este test se han tomado C-rates tales como C, 2C, 4C.

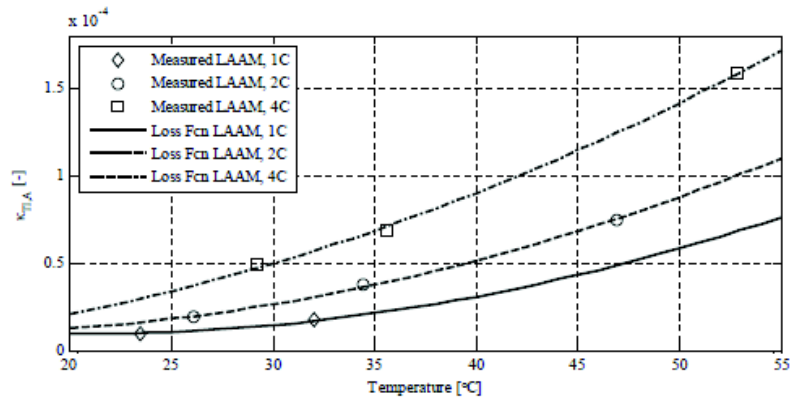


Figure 5.9 Ageing functions $k_{II,A}$ and measured values calculated for Cycle M, N & C

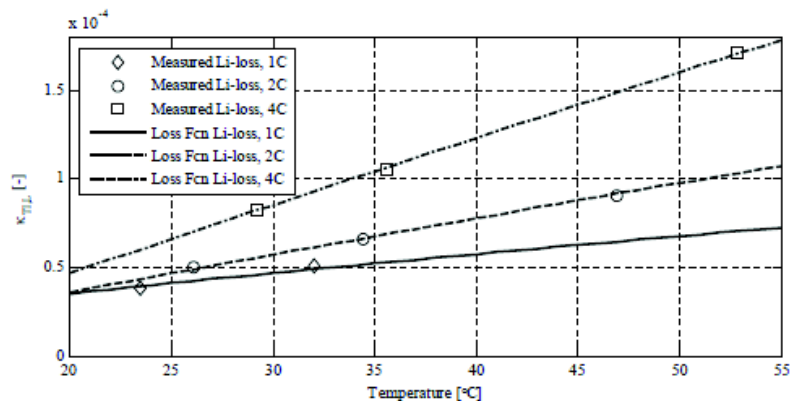


Figure 5.10 Ageing functions $k_{III,L}$ and measured values calculated for Cycle M, N & C

En segundo lugar, se encuentra el parámetro $K_{SOC,AL}$ calculado de forma diferente si estudias la pérdida de capacidad de la celda o del ánodo. Los coeficientes correspondientes están indicados previamente en la tabla 7.

$$K_{SOC,AL} = k_7 e^{-k_8 \cdot SOC} + k_9$$

$$K_{SOC,AL} = k_{10} e^{-k_{11} \cdot SOC} + k_{12} e^{-k_{13} \cdot SOC} + k_{14}$$

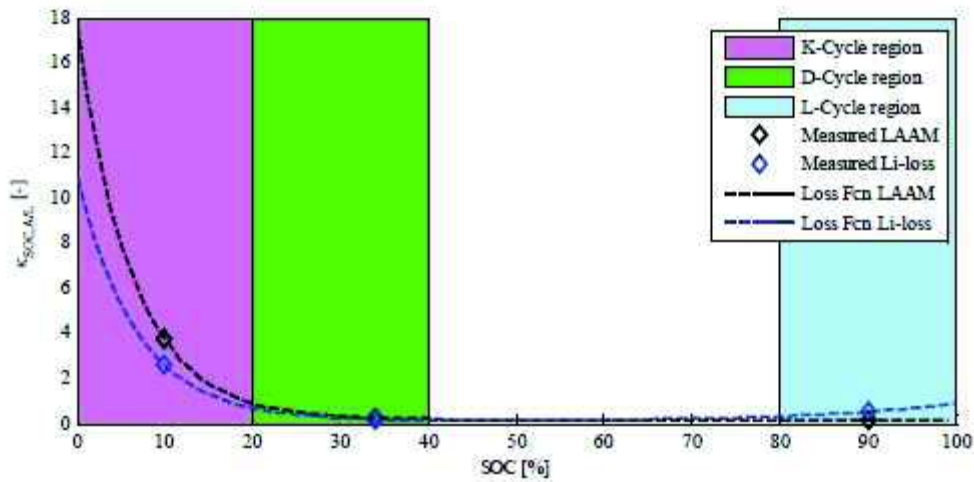


Figure 5.11 Ageing weight functions: $K_{SOC,AL}$ and measured values calculated for Cycle D, K & L

En la figura 5.11 se puede ver claramente que el mejor rango de SOC para una mínima pérdida de capacidad debido al estado de carga de la batería es el rango 40-80%, mientras que los rangos 20-40% y 80-100% son sensiblemente peores, y el rango 0-20% son muy perjudiciales para la vida útil de la batería.

En tercer lugar se encuentra el parámetro K_{CT} , que se define como:

$$K_{CT} = CT_{segment} / CT_{cell}$$

is used where $CT_{segment}$ is normalised according to

$$CT_{segment} = 5 \cdot \int_0^{t_{end}} |I_{segment}| dt / 2 \cdot Q_{ref,cell}$$

and

$$CT_{cell} = \int_0^{t_{end}} |I_{cell}| dt / 2 \cdot Q_{ref,cell}$$

and where $Q_{ref,cell}$ is the total cell capacity in As.

Por lo tanto, $K_{CT} = 1$ para una celda con un rendimiento capacitivo perfectamente uniforme.

Por último, una relación empírica debe ser añadida que tiene en cuenta el SOH ("State of Health") de la batería.

$$\kappa_{SOH, A/Cell} = 1 / (SOH_{A/Cell})^2$$

where SOH_A is the state-of-health of the anode defined as

$$SOH_A = Q_{Anode} / Q_{Anode, BOL}$$

and SOH_{Cell} is the state-of-health of the cell defined as

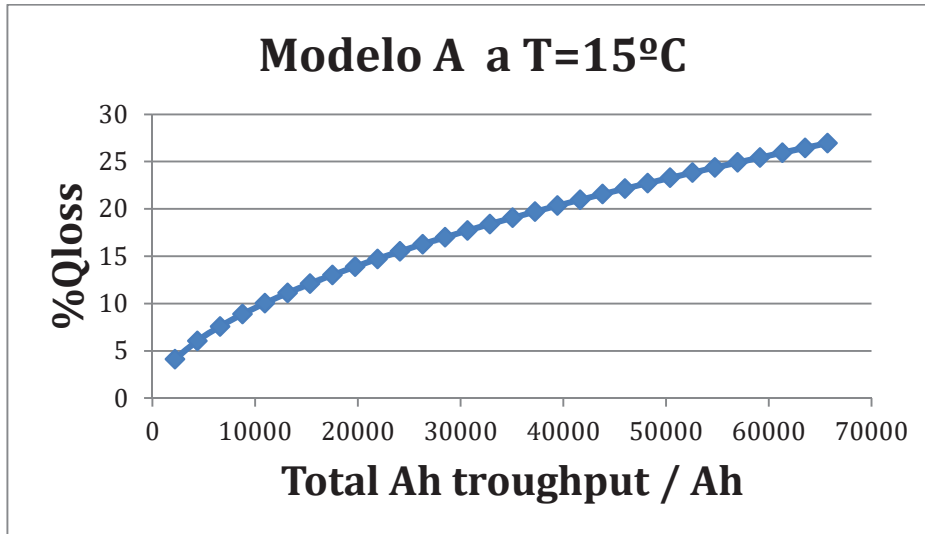
$$SOH_{Cell} = Q_{Cell} / Q_{Cell, BOL}$$

Cabe destacar que esta relación tiene un efecto minoritario en el ratio de envejecimiento hasta que el envejecimiento general es ya bastante grande.

Una vez todos los parámetros están calculados, se puede averiguar el fin de vida útil, el cual se ha estimado en el 80% de vida empezando desde el BOL.

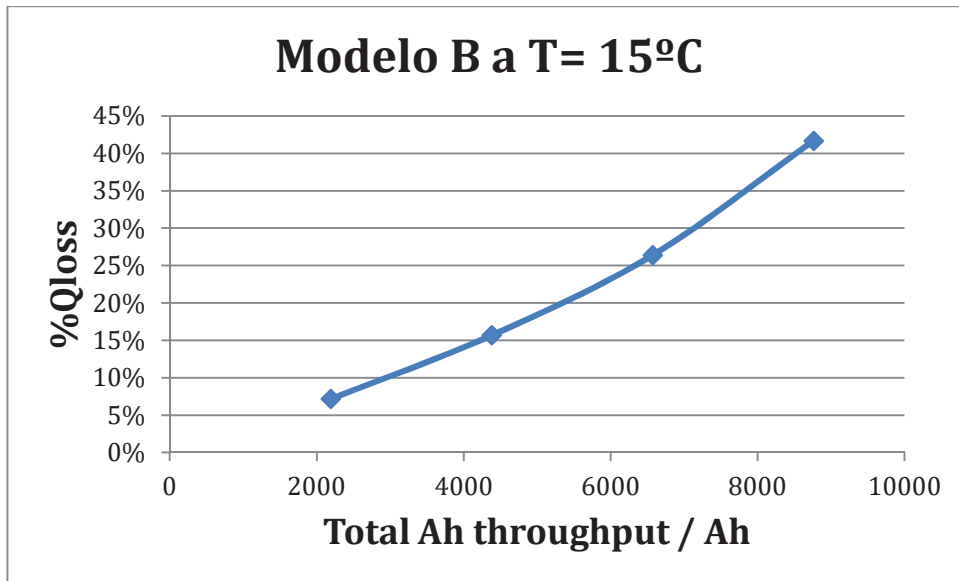
$$EOL_{est, A/L} = \frac{\ln(0.8)}{\ln(1 - \kappa_{Loss, A/L})}$$

ANEXO 5: COMPROBACIÓN DE MODELOS

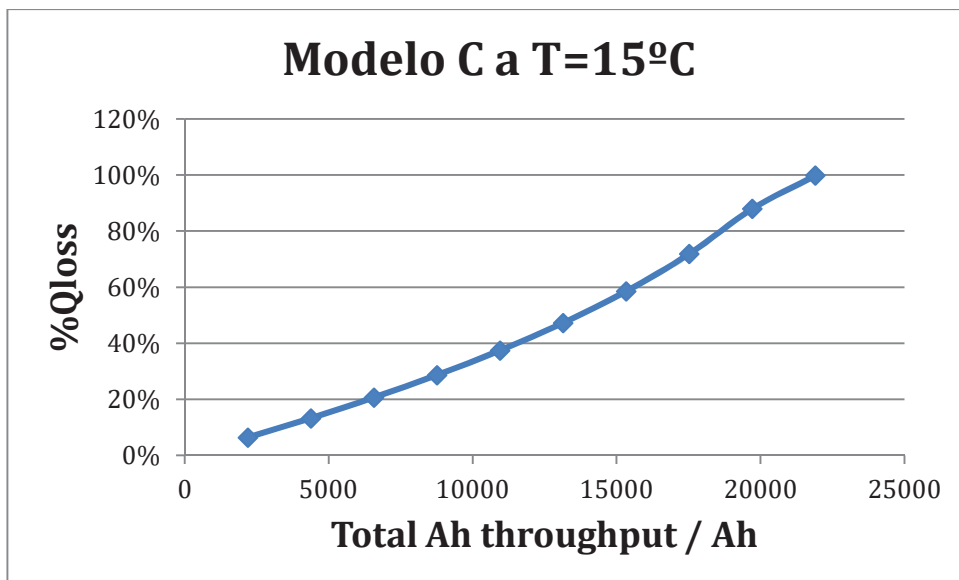


AÑO	Ciclos Batería	Qloss año (%)
1	2190	4,154296
2	4380	6,082463
3	6570	7,602122
4	8760	8,905406
5	10950	10,068292
6	13140	11,130291
7	15330	12,115127
8	17520	13,038394
9	19710	13,911002
10	21900	14,740947
11	24090	15,534299
12	26280	16,295797
13	28470	17,029228
14	30660	17,737675
15	32850	18,423690
16	35040	19,089412
17	37230	19,736656
18	39420	20,366981
19	41610	20,981732
20	43800	21,582087
21	45990	22,169078
22	48180	22,743618
23	50370	23,306521
24	52560	23,858514
25	54750	24,400249
26	56940	24,932317
27	59130	25,455253
28	61320	25,969543

29	63510	26,475631
30	65700	26,973926

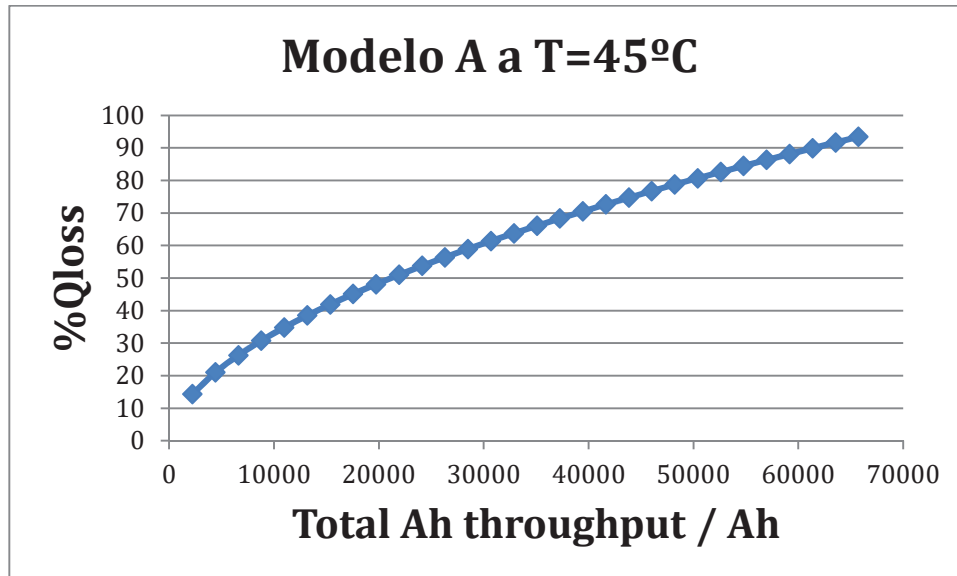


AÑOS	Ciclos Batería	%Qloss cell
1	2190	7%
2	4380	16%
3	6570	26%
4	8760	42%



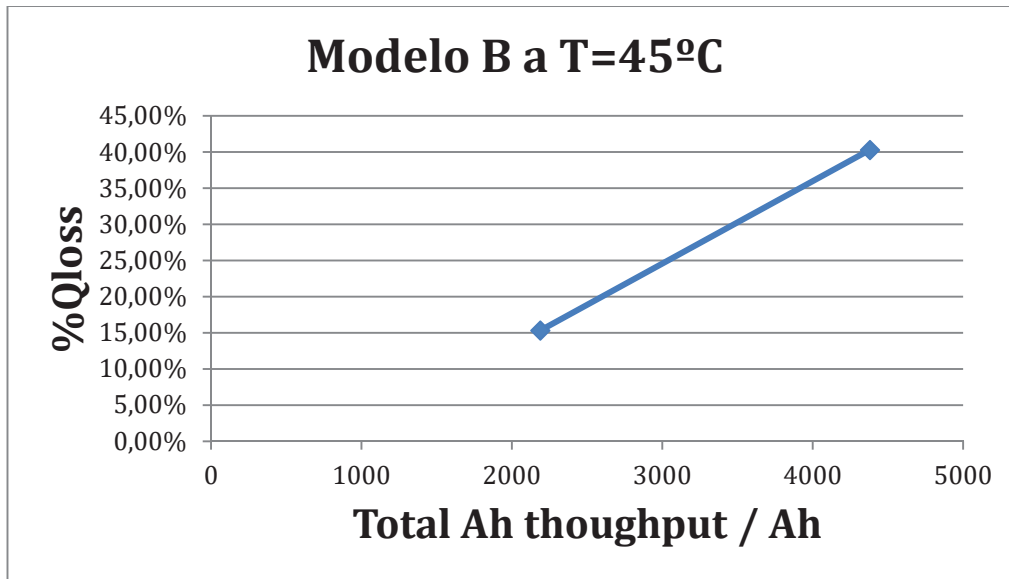
AÑOS	Ciclos Batería	%Qloss cell
1	2190	6%
2	4380	13%
3	6570	21%
4	8760	29%

5	10950	38%
6	13140	47%
7	15330	59%
8	17520	72%
9	19710	88%
10	21900	100%

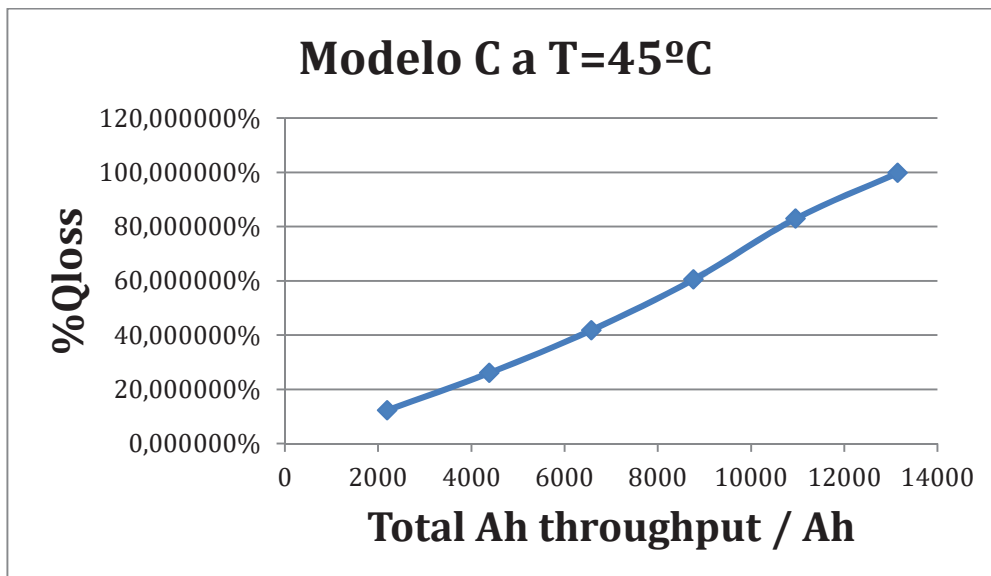


AÑO	Ciclos Batería	Qloss año (%)
1	2189,75	14,3882708
2	4379,75	21,0664071
3	6569,75	26,3296926
4	8759,75	30,8435711
5	10949,75	34,8711845
6	13139,75	38,5493811
7	15329,75	41,9603282
8	17519,75	45,1580309
9	19709,75	48,180279
10	21899,75	51,0547638
11	24089,75	53,8025089
12	26279,75	56,4399304
13	28469,75	58,9801435
14	30659,75	61,4338269
15	32849,75	63,8098155
16	35039,75	66,1155195
17	37229,75	68,3572282
18	39419,75	70,5403347
19	41609,75	72,6695061
20	43799,75	74,748814

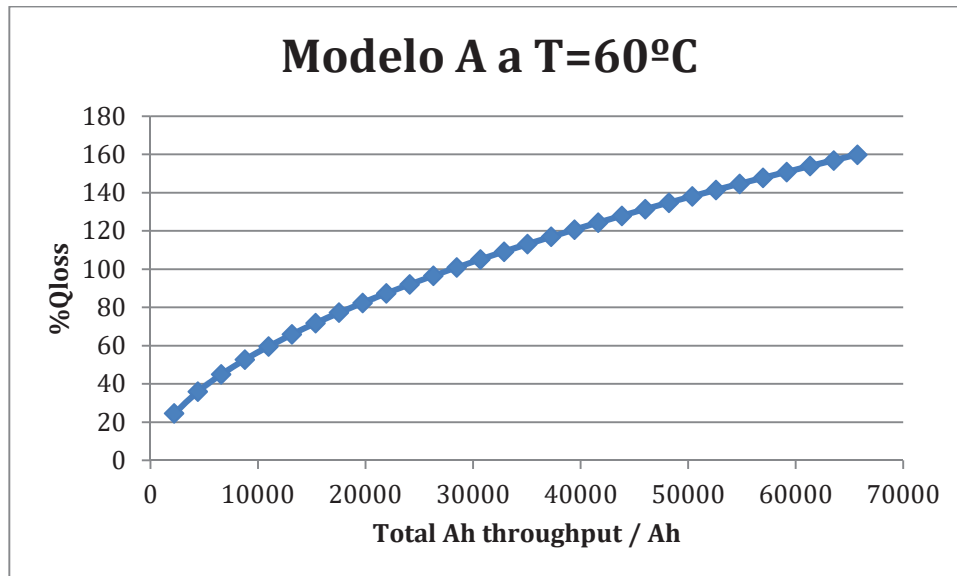
21	45989,75	76,7818362
22	48179,75	78,7717371
23	50369,75	80,7213319
24	52559,75	82,6331385
25	54749,75	84,50942
26	56939,75	86,3522195
27	59129,75	88,1633893
28	61319,75	89,9446146
29	63509,75	91,6974344
30	65699,75	93,4232586



AÑO	Ciclos Batería	%Qloss cell
1	2189,75	15,36%
2	4379,75	40,32%

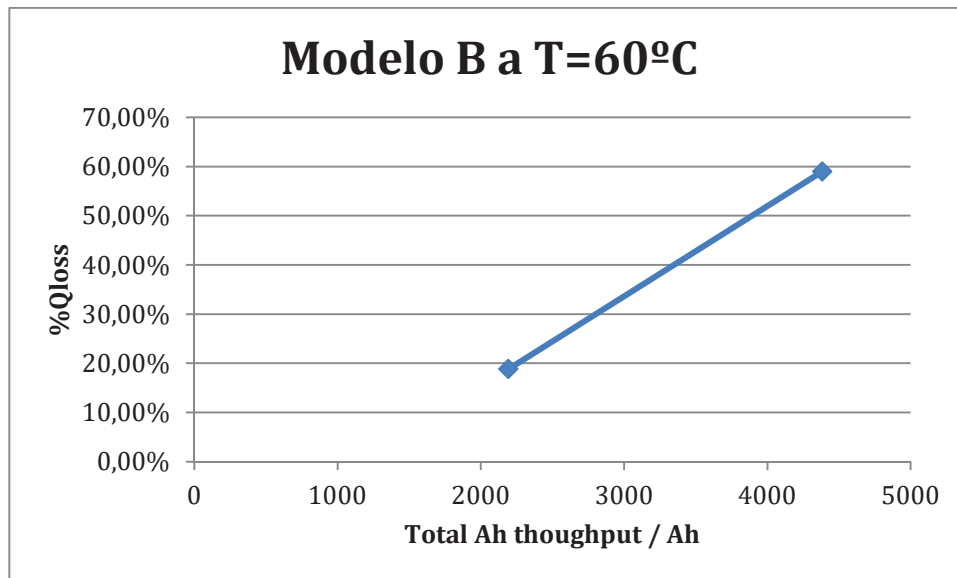


AÑO	ciclos hasta ahora	%Qloss cell
1	2189,75	12,298599%
2	4379,75	26,056037%
3	6569,75	41,835530%
4	8759,75	60,538514%
5	10949,75	83,013823%
6	13139,75	99,821069%

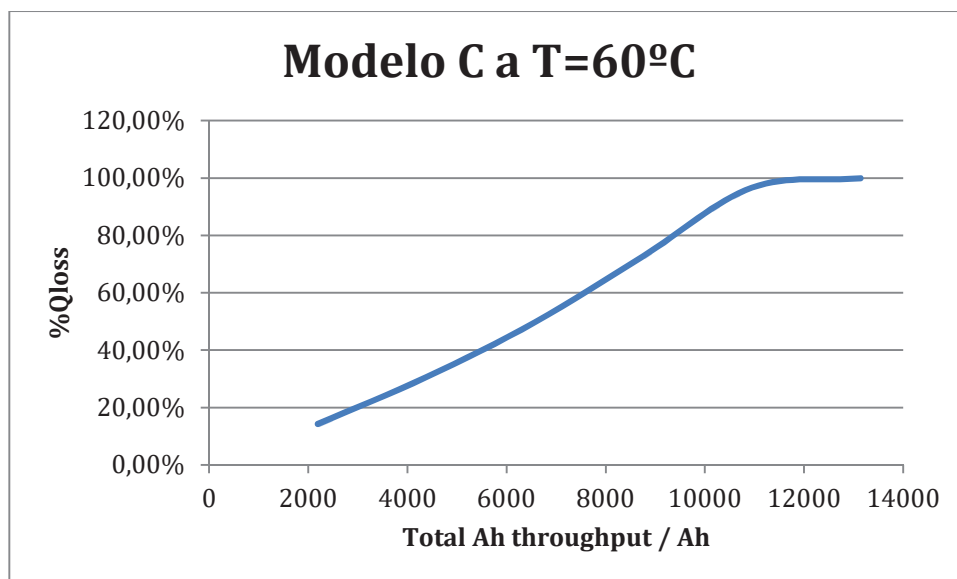


AÑO	Ciclos Batería	Qloss año (%)
1	2189,75	24,6212868
2	4379,75	36,0489432
3	6569,75	45,0555015
4	8759,75	52,7796714
5	10949,75	59,6717422
6	13139,75	65,9658895
7	15329,75	71,8027182
8	17519,75	77,2746421
9	19709,75	82,4463274
10	21899,75	87,3651595
11	24089,75	92,0671139
12	26279,75	96,580282
13	28469,75	100,927107
14	30659,75	105,125861
15	32849,75	109,191664
16	35039,75	113,137196
17	37229,75	116,973219
18	39419,75	120,708961
19	41609,75	124,352409
20	43799,75	127,910531
21	45989,75	131,389448

22	48179,75	134,794576
23	50369,75	138,130732
24	52559,75	141,402224
25	54749,75	144,612926
26	56939,75	147,766334
27	59129,75	150,865616
28	61319,75	153,913657
29	63509,75	156,913091
30	65699,75	159,866329



Años	Ciclos Batería	%Qloss cell
1	2189,75	18,84%
2	4379,75	58,98%





Años	Ciclos batería	%Qloss cell
1	2189,75	14,37%
2	4379,75	30,71%
3	6569,75	49,84%
4	8759,75	72,93%
5	10949,75	96,75%
6	13139,75	100,00%

ANEXO 6: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 1

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss acumulado(%)	Qloss respecto año anterior (%)
1	505,1497645	2,723271707	2,723271707
2	1009,778197	3,985935971	1,262664264
3	1514,406629	4,981247397	0,995311426
4	2019,035061	5,83489728	0,853649883
5	2523,663494	6,596612906	0,761715625
6	3028,291926	7,292260991	0,695648085
7	3532,920358	7,937374643	0,645113653
8	4037,548791	8,542164023	0,604789379
9	4542,177223	9,113774093	0,571610071
10	5046,805655	9,657440735	0,543666642
11	5551,434088	10,17713921	0,519698475
12	6056,06252	10,67597371	0,498834503
13	6560,690952	11,1564243	0,480450587
14	7065,319385	11,62051032	0,464086016
15	7569,947817	12,06990249	0,449392176
16	8074,576249	12,50600216	0,436099665
17	8579,204682	12,92999866	0,423996505
18	9083,833114	13,34291193	0,412913264
19	9588,461546	13,74562457	0,402712643
20	10093,08998	14,13890659	0,393282023
21	10597,71841	14,52343462	0,384528025
22	11102,34684	14,89980709	0,376372468
23	11606,97528	15,26855641	0,368749322
24	12111,60371	15,63015878	0,361602377
25	12616,23214	15,98504222	0,354883435
26	13120,86057	16,33359312	0,348550897
27	13625,489	16,67616176	0,342568642
28	14130,11744	17,01306689	0,336905129
29	14634,74587	17,34459956	0,331532674
30	15139,3743	17,67102643	0,326426866

MODELO B

Años	Ciclos Batería	%Qloss
1	505,1497645	2,659857%
2	1009,778197	5,470041%
3	1514,406629	8,458039%
4	2019,035061	11,654966%
5	2523,663494	15,101683%
6	3028,291926	18,853569%
7	3532,920358	22,988713%

MODELO C

Años	Ciclos Batería	%Qloss
1	505,1497645	2,653003%
2	1009,778197	5,372986%
3	1514,406629	8,168857%
4	2019,035061	11,047200%
5	2523,663494	14,015594%
6	3028,291926	17,082834%
7	3532,920358	20,259223%

ERROR MODELOS B Y C

DIFERENCIA MODELO B y C	
Años	Error Ccell
1	0,006854%
2	0,097055%
3	0,289182%
4	0,607766%
5	1,086090%
6	1,770734%
7	2,729490%

ANEXO 7: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 2

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss acumulado (%)	Qloss respecto año anterior (%)
1	1149,827236	4,376393	10,153231%
2	2299,654471	6,407414	4,711969%
3	3449,481707	8,008165	3,713741%
4	4599,308942	9,381003	3,184986%
5	5749,136178	10,605956	2,841889%
6	6898,963413	11,724639	2,595346%
7	8048,790649	12,762044	2,406778%
8	9198,617884	13,734593	2,256315%
9	10348,44512	14,653780	2,132515%
10	11498,27236	15,528028	2,028254%
11	12648,09959	16,363729	1,938827%
12	13797,92683	17,165877	1,860983%
13	14947,75406	17,938459	1,792392%
14	16097,5813	18,684725	1,731337%
15	17247,40853	19,407361	1,676515%
16	18397,23577	20,108621	1,626923%

MODELO B

Años	Ciclos Batería	%Qloss
1	1149,827236	5,98%
2	2299,654471	12,84%
3	3449,481707	20,99%

MODELO C

Años	Ciclos Batería	%Qloss
1	1149,827236	5,75%
2	2299,654471	11,83%
3	3449,481707	18,30%
4	4599,308942	25,24%

ERROR MODELOS B Y C

Años	Diferencia Ccell modelo B y C
1	0,23%
2	1,01%
3	2,69%
4	6,05%
5	13,47%

ANEXO 8: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 3

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss acumulado (%)	Qloss respecto año anterior (%)
1	32,53986503	0,592968018	1,38%
2	65,24183587	0,869347093	0,64%
3	97,94380671	1,087030051	0,51%
4	130,6457776	1,273669854	0,43%
5	163,3477484	1,440179969	0,39%
6	196,0497192	1,592230856	0,35%
7	228,7516901	1,733225384	0,33%
8	261,4536609	1,865399313	0,31%
9	294,1556318	1,990316704	0,29%
10	326,8576026	2,109123436	0,28%
11	359,5595734	2,222689334	0,26%
12	392,2615443	2,331693522	0,25%
13	424,9635151	2,43667851	0,24%
14	457,665486	2,538085981	0,24%
15	490,3674568	2,636281336	0,23%
16	523,0694276	2,73157103	0,22%
17	555,7713985	2,824215145	0,21%
18	588,4733693	2,9144367	0,21%
19	621,1753402	3,00242868	0,20%
20	653,877311	3,088359439	0,20%
21	686,5792819	3,172376909	0,19%
22	719,2812527	3,254611923	0,19%
23	751,9832235	3,335180876	0,19%
24	784,6851944	3,414187868	0,18%
25	817,3871652	3,491726464	0,18%
26	850,0891361	3,56788113	0,18%
27	882,7911069	3,642728437	0,17%
28	915,4930777	3,716338056	0,17%
29	948,1950486	3,78877361	0,17%
30	980,8970194	3,86009338	0,17%

MODELO B

AÑOS	ciclos batería	%Qloss
1	32,539865	0,06%
2	65,2418359	0,11%
3	97,9438067	0,17%
4	130,645778	0,22%
5	163,347748	0,28%
6	196,049719	0,33%
7	228,75169	0,39%
8	261,453661	0,44%
9	294,155632	0,50%

10	326,857603	0,56%
11	359,559573	0,61%
12	392,261544	0,67%
13	424,963515	0,72%
14	457,665486	0,78%
15	490,367457	0,83%
16	523,069428	0,89%
17	555,771398	0,94%
18	588,473369	1,00%
19	621,17534	1,06%
20	653,877311	1,11%
21	686,579282	1,17%
22	719,281253	1,22%
23	751,983224	1,28%
24	784,685194	1,33%
25	817,387165	1,39%
26	850,089136	1,45%
27	882,791107	1,50%
28	915,493078	1,56%
29	948,195049	1,61%
30	980,897019	1,67%

MODELO C

AÑOS	ciclos batería	%Qloss
1	32,539865	0,06%
2	65,2418359	0,11%
3	97,9438067	0,17%
4	130,645778	0,22%
5	163,347748	0,28%
6	196,049719	0,33%
7	228,75169	0,39%
8	261,453661	0,45%
9	294,155632	0,50%
10	326,857603	0,56%
11	359,559573	0,61%
12	392,261544	0,67%
13	424,963515	0,72%
14	457,665486	0,78%
15	490,367457	0,84%
16	523,069428	0,89%
17	555,771398	0,95%
18	588,473369	1,00%
19	621,17534	1,06%
20	653,877311	1,12%
21	686,579282	1,17%

22	719,281253	1,23%
23	751,983224	1,29%
24	784,685194	1,34%
25	817,387165	1,40%
26	850,089136	1,46%
27	882,791107	1,51%
28	915,493078	1,57%
29	948,195049	1,63%
30	980,897019	1,68%

ERROR MODELOS B Y C

Años	Diferencia Ccell modelo anual vs horario
1	0,000046%
2	0,000120%
3	0,000224%
4	0,000360%
5	0,000526%
6	0,000724%
7	0,000952%
8	0,001212%
9	0,001504%
10	0,001826%
11	0,002181%
12	0,002567%
13	0,002985%
14	0,003436%
15	0,003918%
16	0,004433%
17	0,004980%
18	0,005560%
19	0,006172%
20	0,006817%
21	0,007495%
22	0,008206%
23	0,008950%
24	0,009728%
25	0,010539%
26	0,011384%
27	0,012262%
28	0,013174%
29	0,014121%
30	0,015101%

ANEXO 9: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 4

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss año (%)	Qloss respecto año anterior (%)
1	51,0662115	0,76024014	0,76024014
2	102,386823	1,11458557	0,35434543
3	153,707434	1,39367654	0,27909097
4	205,028045	1,63296706	0,23929052
5	256,348656	1,8464493	0,21348225
6	307,669267	2,04139339	0,19494408
7	358,989879	2,22216212	0,18076874
8	410,31049	2,39162198	0,16945986
9	461,631101	2,55177825	0,16015627
10	512,951712	2,70410005	0,1523218
11	564,272323	2,84970259	0,14560254
12	615,592934	2,98945656	0,13975398
13	666,913546	3,12405753	0,13460097
14	718,234157	3,25407178	0,13001424
15	769,554768	3,37996777	0,12589599
16	820,875379	3,50213842	0,12217065
17	872,19599	3,62091719	0,11877876
18	923,516601	3,73658999	0,1156728
19	974,837213	3,84940427	0,11281427
20	1026,15782	3,95957585	0,11017159
21	1077,47844	4,06729441	0,10771856
22	1128,79905	4,1727277	0,10543328
23	1180,11966	4,27602492	0,10329723
24	1231,44027	4,37731956	0,10129464
25	1282,76088	4,47673158	0,09941201
26	1334,08149	4,57436926	0,09763768
27	1385,4021	4,67033078	0,09596152
28	1436,72271	4,76470546	0,09437468
29	1488,04332	4,85757488	0,09286942
30	1539,36394	4,94901375	0,09143887

MODELO B

Años	ciclos batería	%Qloss
1	51,0662115	0,08%
2	102,386823	0,16%
3	153,707434	0,24%
4	205,028045	0,32%
5	256,348656	0,40%
6	307,669267	0,48%

7	358,989879	0,56%
8	410,31049	0,64%
9	461,631101	0,72%
10	512,951712	0,80%
11	564,272323	0,88%
12	615,592934	0,96%
13	666,913546	1,04%
14	718,234157	1,12%
15	769,554768	1,20%
16	820,875379	1,28%
17	872,19599	1,36%
18	923,516601	1,44%
19	974,837213	1,52%
20	1026,15782	1,61%
21	1077,47844	1,69%
22	1128,79905	1,77%
23	1180,11966	1,85%
24	1231,44027	1,93%
25	1282,76088	2,01%
26	1334,08149	2,10%
27	1385,4021	2,18%
28	1436,72271	2,26%
29	1488,04332	2,34%
30	1539,36394	2,43%

MODELO C

Años	ciclos batería	%Qloss
1	51,0662115	0,08%
2	102,386823	0,16%
3	153,707434	0,24%
4	205,028045	0,32%
5	256,348656	0,40%
6	307,669267	0,48%
7	358,989879	0,56%
8	410,31049	0,64%
9	461,631101	0,72%
10	512,951712	0,79%
11	564,272323	0,87%
12	615,592934	0,95%
13	666,913546	1,03%
14	718,234157	1,11%
15	769,554768	1,19%
16	820,875379	1,27%
17	872,19599	1,35%

18	923,516601	1,43%
19	974,837213	1,51%
20	1026,15782	1,59%
21	1077,47844	1,67%
22	1128,79905	1,75%
23	1180,11966	1,83%
24	1231,44027	1,91%
25	1282,76088	1,99%
26	1334,08149	2,07%
27	1385,4021	2,15%
28	1436,72271	2,23%
29	1488,04332	2,31%
30	1539,36394	2,40%

ERROR MODELOS B Y C

AÑOS	Diferencia Ccell modelo B vs C
1	0,000093%
2	0,000243%
3	0,000457%
4	0,000733%
5	0,001074%
6	0,001478%
7	0,001947%
8	0,002481%
9	0,003079%
10	0,003744%
11	0,004474%
12	0,005270%
13	0,006133%
14	0,007063%
15	0,008061%
16	0,009126%
17	0,010259%
18	0,011461%
19	0,012731%
20	0,014071%
21	0,015481%
22	0,016961%
23	0,018511%
24	0,020132%
25	0,021825%
26	0,023589%
27	0,025425%
28	0,027334%
29	0,029316%
30	0,031372%

ANEXO 10: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 5

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss año (%)	Qloss respecto al año anterior (%)
1	67,9230192	0,88989049	0,88989049
2	136,184415	1,3046674	0,41477691
3	204,44581	1,63135542	0,32668802
4	272,707206	1,91145522	0,2800998
5	340,968601	2,16134529	0,24989007
6	409,229996	2,38953563	0,22819034
7	477,491392	2,60113312	0,21159748
8	545,752787	2,79949307	0,19835995
9	614,014183	2,98696276	0,18746969
10	682,275578	3,16526188	0,17829911
11	750,536974	3,3356958	0,17043393
12	818,798369	3,49928374	0,16358794
13	887,059765	3,65683987	0,15755612
14	955,32116	3,80902703	0,15218716
15	1023,58256	3,95639361	0,14736658
16	1091,84395	4,09939952	0,14300591
17	1160,10535	4,23843507	0,13903556
18	1228,36674	4,37383497	0,1353999
19	1296,62814	4,50588884	0,13205387
20	1364,88953	4,63484933	0,12896049
21	1433,15093	4,76093845	0,12608912
22	1501,41232	4,88435255	0,1234141
23	1569,67372	5,00526631	0,12091376
24	1637,93511	5,12383595	0,11856965
25	1706,19651	5,24020191	0,11636595
26	1774,45791	5,35449093	0,11428902
27	1842,7193	5,46681793	0,112327
28	1910,9807	5,57728747	0,11046954
29	1979,24209	5,68599504	0,10870757
30	2047,50349	5,79302809	0,10703305

MODELO B

AÑO	Ciclos Batería	%Qloss
1	67,9230192	0,10%
2	136,184415	0,21%
3	204,44581	0,32%
4	272,707206	0,42%
5	340,968601	0,53%

6	409,229996	0,64%
7	477,491392	0,74%
8	545,752787	0,85%
9	614,014183	0,96%
10	682,275578	1,07%
11	750,536974	1,17%
12	818,798369	1,28%
13	887,059765	1,39%
14	955,32116	1,50%
15	1023,58256	1,61%
16	1091,84395	1,72%
17	1160,10535	1,83%
18	1228,36674	1,94%
19	1296,62814	2,05%
20	1364,88953	2,16%
21	1433,15093	2,27%
22	1501,41232	2,38%
23	1569,67372	2,49%
24	1637,93511	2,60%
25	1706,19651	2,71%
26	1774,45791	2,83%
27	1842,7193	2,94%
28	1910,9807	3,05%
29	1979,24209	3,16%
30	2047,50349	3,28%

MODELO C

AÑO	ciclos batería	%Qloss cell
1	67,9230192	0,10%
2	136,184415	0,21%
3	204,44581	0,32%
4	272,707206	0,42%
5	340,968601	0,53%
6	409,229996	0,63%
7	477,491392	0,74%
8	545,752787	0,85%
9	614,014183	0,95%
10	682,275578	1,06%
11	750,536974	1,17%
12	818,798369	1,27%
13	887,059765	1,38%
14	955,32116	1,49%
15	1023,58256	1,60%
16	1091,84395	1,70%
17	1160,10535	1,81%

18	1228,36674	1,92%
19	1296,62814	2,03%
20	1364,88953	2,13%
21	1433,15093	2,24%
22	1501,41232	2,35%
23	1569,67372	2,46%
24	1637,93511	2,57%
25	1706,19651	2,67%
26	1774,45791	2,78%
27	1842,7193	2,89%
28	1910,9807	3,00%
29	1979,24209	3,11%
30	2047,50349	3,22%

ERROR MODELOS B Y C

AÑOS	Diferencia Ccell modelo B vs C
1	0,000131%
2	0,000402%
3	0,000786%
4	0,001285%
5	0,001900%
6	0,002631%
7	0,003479%
8	0,004446%
9	0,005531%
10	0,006737%
11	0,008064%
12	0,009512%
13	0,011083%
14	0,012778%
15	0,014598%
16	0,016543%
17	0,018615%
18	0,020814%
19	0,023142%
20	0,025600%
21	0,028188%
22	0,030907%
23	0,033760%
24	0,036746%
25	0,039866%
26	0,043123%
27	0,046516%
28	0,050047%
29	0,053717%
30	0,057528%

ANEXO 11: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 8

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss acumulado (%)	Qloss respecto año anterior (%)
1	67,90010425	0,889724665	0,889724665
2	136,0671999	1,304047056	0,414322391
3	204,2342955	1,630423011	0,326375955
4	272,4013911	1,910271002	0,279847991
5	340,5684867	2,159944078	0,249673076
6	408,7355823	2,387940669	0,227996591
7	476,9026779	2,599361303	0,211420634
8	545,0697735	2,797557399	0,198196096
9	613,2368691	2,984873622	0,187316223
10	681,4039647	3,163027816	0,178154194
11	749,5710603	3,333324023	0,170296207
12	817,7381559	3,496780412	0,163456389
13	885,9052516	3,654210352	0,15742994
14	954,0723472	3,806276057	0,152065705
15	1022,239443	3,953525379	0,147249322
16	1090,406538	4,0964178	0,142892421
17	1158,573634	4,235343276	0,138925476
18	1226,74073	4,370636194	0,135292918
19	1294,907825	4,502585913	0,131949719
20	1363,074921	4,631444864	0,128858951
21	1431,242016	4,757434856	0,125989992
22	1499,409112	4,880752062	0,123317206
23	1567,576208	5,001571007	0,120818945
24	1635,743303	5,120047786	0,118476778
25	1703,910399	5,236322269	0,116274904
26	1772,077494	5,350522374	0,114199684
27	1840,24459	5,46276165	0,112239276
28	1908,411686	5,57314499	0,11038334
29	1976,578781	5,681767792	0,108622801
30	2044,745877	5,788717449	0,106949657

MODELO B

AÑO	Ciclos Batería	%Qloss
1	67,9001043	0,10%
2	136,0672	0,20%
3	204,234295	0,30%
4	272,401391	0,40%
5	340,568487	0,50%
6	408,735582	0,60%
7	476,902678	0,70%
8	545,069774	0,80%

9	613,236869	0,90%
10	681,403965	1,01%
11	749,57106	1,11%
12	817,738156	1,21%
13	885,905252	1,31%
14	954,072347	1,41%
15	1022,23944	1,51%
16	1090,40654	1,62%
17	1158,57363	1,72%
18	1226,74073	1,82%
19	1294,90783	1,92%
20	1363,07492	2,03%
21	1431,24202	2,13%
22	1499,40911	2,23%
23	1567,57621	2,34%
24	1635,7433	2,44%
25	1703,9104	2,55%
26	1772,07749	2,65%
27	1840,24459	2,76%
28	1908,41169	2,86%
29	1976,57878	2,97%
30	2044,74588	3,07%

MODELO C

AÑO	Ciclos batería	%Qloss
1	67,9001043	0,10%
2	136,0672	0,20%
3	204,234295	0,30%
4	272,401391	0,40%
5	340,568487	0,50%
6	408,735582	0,60%
7	476,902678	0,70%
8	545,069774	0,80%
9	613,236869	0,90%
10	681,403965	1,00%
11	749,57106	1,10%
12	817,738156	1,20%
13	885,905252	1,30%
14	954,072347	1,40%
15	1022,23944	1,50%
16	1090,40654	1,60%
17	1158,57363	1,70%
18	1226,74073	1,80%
19	1294,90783	1,90%
20	1363,07492	2,01%

21	1431,24202	2,11%
22	1499,40911	2,21%
23	1567,57621	2,31%
24	1635,7433	2,41%
25	1703,9104	2,51%
26	1772,07749	2,61%
27	1840,24459	2,72%
28	1908,41169	2,82%
29	1976,57878	2,92%
30	2044,74588	3,02%

ERROR MODELOS B Y C

AÑOS	Diferencia Ccell modelo B vs C
1	0,000142%
2	0,000382%
3	0,000721%
4	0,001161%
5	0,001702%
6	0,002346%
7	0,003092%
8	0,003943%
9	0,004897%
10	0,005957%
11	0,007123%
12	0,008395%
13	0,009775%
14	0,011262%
15	0,012859%
16	0,014566%
17	0,016383%
18	0,018311%
19	0,020351%
20	0,022505%
21	0,024772%
22	0,027154%
23	0,029651%
24	0,032264%
25	0,034995%
26	0,037843%
27	0,040811%
28	0,043898%
29	0,047106%
30	0,050435%

ANEXO 12: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 9

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss año (%)	Qloss respecto al año anterior (%)
1	20,70924237	0,462293211	0,462293211
2	41,01460786	0,673194277	0,210901066
3	61,73457862	0,842977387	0,16978311
4	81,27994748	0,980646101	0,137668714
5	101,8775225	1,110363961	0,12971786
6	122,4732812	1,228699099	0,118335138
7	142,9793379	1,337898908	0,109199809
8	163,1656739	1,43869386	0,100794953
9	183,4477905	1,534455261	0,095761401
10	203,9096502	1,626347173	0,091891912
11	224,5475717	1,714914265	0,088567092
12	244,7790493	1,798243183	0,083328918
13	265,6624888	1,881069199	0,082826016
14	286,4657197	1,960710586	0,079641387
15	306,700055	2,035710075	0,074999489
16	327,2058453	2,109477709	0,073767634
17	347,733044	2,181266389	0,07178868
18	367,8604586	2,24982567	0,068559281
19	387,890131	2,316395125	0,066569455
20	408,1554648	2,382192309	0,065797184
21	428,6382484	2,447218738	0,065026429
22	449,2559724	2,511276567	0,064057829
23	469,5351103	2,573002869	0,061726302
24	490,7002489	2,636162921	0,063160052
25	510,6539022	2,694589806	0,058426885
26	530,7465646	2,752395046	0,05780524
27	550,5010766	2,80827378	0,055878735
28	571,229911	2,86595025	0,05767647
29	591,3356509	2,920997692	0,055047441
30	611,2029442	2,97457012	0,053572429

MODELO B

AÑO	Ciclos Batería	%Qloss
1	20,064352	0,12%
2	39,8955853	0,23%
3	59,7268187	0,35%
4	79,5580521	0,47%
5	99,3892855	0,59%
6	119,220519	0,70%
7	139,051752	0,82%
8	158,882986	0,94%
9	178,714219	1,06%

10	198,545452	1,18%
11	218,376686	1,30%
12	238,207919	1,42%
13	258,039152	1,54%
14	277,870386	1,66%
15	297,701619	1,78%
16	317,532853	1,90%
17	337,364086	2,02%
18	357,195319	2,15%
19	377,026553	2,27%
20	396,857786	2,39%
21	416,68902	2,51%
22	436,520253	2,64%
23	456,351486	2,76%
24	476,18272	2,88%
25	496,013953	3,01%
26	515,845186	3,13%
27	535,67642	3,26%
28	555,507653	3,38%
29	575,338887	3,51%
30	595,17012	3,63%

MODELO C

AÑO	ciclos batería	%Qloss
1	20,064352	0,12%
2	39,8955853	0,23%
3	59,7268187	0,35%
4	79,5580521	0,47%
5	99,3892855	0,58%
6	119,220519	0,70%
7	139,051752	0,82%
8	158,882986	0,94%
9	178,714219	1,05%
10	198,545452	1,17%
11	218,376686	1,29%
12	238,207919	1,41%
13	258,039152	1,53%
14	277,870386	1,64%
15	297,701619	1,76%
16	317,532853	1,88%
17	337,364086	2,00%
18	357,195319	2,12%
19	377,026553	2,24%
20	396,857786	2,36%
21	416,68902	2,48%

22	436,520253	2,60%
23	456,351486	2,72%
24	476,18272	2,84%
25	496,013953	2,96%
26	515,845186	3,08%
27	535,67642	3,20%
28	555,507653	3,32%
29	575,338887	3,44%
30	595,17012	3,56%

ERROR MODELOS B Y C

AÑOS	Diferencia Ccell modelo B vs C
1	0,000214%
2	0,000567%
3	0,001059%
4	0,001691%
5	0,002465%
6	0,003381%
7	0,004442%
8	0,005647%
9	0,006998%
10	0,008497%
11	0,010144%
12	0,011941%
13	0,013889%
14	0,015990%
15	0,018245%
16	0,020654%
17	0,023220%
18	0,025944%
19	0,028827%
20	0,031870%
21	0,035075%
22	0,038444%
23	0,041977%
24	0,045676%
25	0,049543%
26	0,053578%
27	0,057785%
28	0,062163%
29	0,066715%
30	0,071442%

ANEXO 13: RESULTADOS CASO DE ESTUDIO 10

MODELO A

Años	Ciclos hasta ahora	Qloss año (%)	Qloss respecto al año anterior (%)
1	65,55219222	0,872599675	0,872599675
2	131,3313033	1,278781361	0,406181687
3	196,8821393	1,597742054	0,318960692
4	262,4274053	1,87131948	0,273577427
5	327,6068887	2,114149928	0,242830447
6	393,9809293	2,339941963	0,225792036
7	459,7995151	2,54745625	0,207514287
8	525,3902133	2,741315152	0,193858902
9	591,4929684	2,92594971	0,184634558
10	657,7017481	3,101781886	0,175832176
11	723,930919	3,269861406	0,16807952
12	790,0909245	3,430984426	0,161123019
13	856,2876438	3,58622542	0,155240995
14	922,5132306	3,736216831	0,14999141
15	988,8502182	3,881676704	0,145459874
16	1054,730753	4,021845878	0,140169173
17	1120,127662	4,157135874	0,135289996
18	1185,001519	4,287870338	0,130734464
19	1249,936598	4,415541142	0,127670804
20	1316,509998	4,543383713	0,12784257
21	1383,362821	4,668869207	0,125485495
22	1449,4416	4,790241269	0,121372061
23	1515,69339	4,909457157	0,119215888
24	1581,132729	5,024924311	0,115467154
25	1647,421233	5,139723408	0,114799097
26	1714,401246	5,253632186	0,113908778
27	1780,157447	5,363519104	0,109886918
28	1845,941596	5,471639815	0,10812071
29	1911,88621	5,578298587	0,106658772
30	1977,066274	5,682100888	0,103802301

MODELO B

AÑO	Ciclos Batería	%Qloss
1	65,2968419	0,10%
2	130,818568	0,20%
3	196,340295	0,31%
4	261,862021	0,41%
5	327,383748	0,51%
6	392,905474	0,61%
7	458,427201	0,72%
8	523,948927	0,82%
9	589,470654	0,92%

10	654,99238	1,03%
11	720,514107	1,13%
12	786,035833	1,23%
13	851,55756	1,34%
14	917,079286	1,44%
15	982,601013	1,55%
16	1048,12274	1,65%
17	1113,64447	1,76%
18	1179,16619	1,86%
19	1244,68792	1,97%
20	1310,20964	2,07%
21	1375,73137	2,18%
22	1441,2531	2,29%
23	1506,77482	2,39%
24	1572,29655	2,50%
25	1637,81828	2,61%
26	1703,34	2,71%
27	1768,86173	2,82%
28	1834,38346	2,93%
29	1899,90518	3,04%
30	1965,42691	3,14%

MODELO C

AÑO	ciclos batería	%Qloss
1	65,2968419	0,10%
2	130,818568	0,20%
3	196,340295	0,30%
4	261,862021	0,41%
5	327,383748	0,51%
6	392,905474	0,61%
7	458,427201	0,71%
8	523,948927	0,81%
9	589,470654	0,92%
10	654,99238	1,02%
11	720,514107	1,12%
12	786,035833	1,22%
13	851,55756	1,33%
14	917,079286	1,43%
15	982,601013	1,53%
16	1048,12274	1,64%
17	1113,64447	1,74%
18	1179,16619	1,84%
19	1244,68792	1,94%
20	1310,20964	2,05%
21	1375,73137	2,15%

22	1441,2531	2,26%
23	1506,77482	2,36%
24	1572,29655	2,46%
25	1637,81828	2,57%
26	1703,34	2,67%
27	1768,86173	2,78%
28	1834,38346	2,88%
29	1899,90518	2,98%
30	1965,42691	3,09%

ERROR MODELOS B Y C

AÑOS	Diferencia Ccell modelo B vs C
1	0,000192%
2	0,000492%
3	0,000897%
4	0,001407%
5	0,002024%
6	0,002749%
7	0,003582%
8	0,004523%
9	0,005574%
10	0,006736%
11	0,008009%
12	0,009394%
13	0,010893%
14	0,012504%
15	0,014231%
16	0,016073%
17	0,018031%
18	0,020106%
19	0,022300%
20	0,024612%
21	0,027044%
22	0,029597%
23	0,032271%
24	0,035068%
25	0,037988%
26	0,041033%
27	0,044203%
28	0,047500%
29	0,050923%
30	0,054475%

ANEXO 14: RESULTADOS COMPARACIÓN CASOS DE ESTUDIO

MODELO A

AÑOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
1	2,72327171	4,37639285	0,59296802	0,76024014
2	3,98593597	6,40741418	0,86934709	1,11458557
3	4,9812474	8,00816459	1,08703005	1,39367654
4	5,83489728	9,38100345	1,27366985	1,63296706
5	6,59661291	10,6059556	1,44017997	1,8464493
6	7,29226099	11,7246392	1,59223086	2,04139339
7	7,93737464	12,7620436	1,73322538	2,22216212
8	8,54216402	13,734593	1,86539931	2,39162198
9	9,11377409	14,6537805	1,9903167	2,55177825
10	9,65744074	15,5280278	2,10912344	2,70410005
11	10,1771392	16,3637289	2,22268933	2,84970259
12	10,6759737	17,1658766	2,33169352	2,98945656
13	11,1564243	17,9384595	2,43667851	3,12405753
14	11,6205103	18,6847254	2,53808598	3,25407178
15	12,0699025	19,4073614	2,63628134	3,37996777
16	12,5060022	20,1086211	2,73157103	3,50213842
17	12,9299987		2,82421515	3,62091719
18	13,3429119		2,9144367	3,73658999
19	13,7456246		3,00242868	3,84940427
20	14,1389066		3,08835944	3,95957585
21	14,5234346		3,17237691	4,06729441
22	14,8998071		3,25461192	4,1727277
23	15,2685564		3,33518088	4,27602492
24	15,6301588		3,41418787	4,37731956
25	15,9850422		3,49172646	4,47673158
26	16,3335931		3,56788113	4,57436926
27	16,6761618		3,64272844	4,67033078
28	17,0130669		3,71633806	4,76470546
29	17,3445996		3,78877361	4,85757488
30	17,6710264		3,86009338	4,94901375

AÑOS	CASO 5	CASO 8	CASO 9	CASO 10
1	0,88989049	0,88972466	0,46229321	0,87259967
2	1,3046674	1,30404706	0,67319428	1,27878136
3	1,63135542	1,63042301	0,84297739	1,59774205
4	1,91145522	1,910271	0,9806461	1,87131948
5	2,16134529	2,15994408	1,11036396	2,11414993
6	2,38953563	2,38794067	1,2286991	2,33994196
7	2,60113312	2,5993613	1,33789891	2,54745625
8	2,79949307	2,7975574	1,43869386	2,74131515
9	2,98696276	2,98487362	1,53445526	2,92594971

10	3,16526188	3,16302782	1,62634717	3,10178189
11	3,3356958	3,33332402	1,71491426	3,26986141
12	3,49928374	3,49678041	1,79824318	3,43098443
13	3,65683987	3,65421035	1,8810692	3,58622542
14	3,80902703	3,80627606	1,96071059	3,73621683
15	3,95639361	3,95352538	2,03571007	3,8816767
16	4,09939952	4,0964178	2,10947771	4,02184588
17	4,23843507	4,23534328	2,18126639	4,15713587
18	4,37383497	4,37063619	2,24982567	4,28787034
19	4,50588884	4,50258591	2,31639513	4,41554114
20	4,63484933	4,63144486	2,38219231	4,54338371
21	4,76093845	4,75743486	2,44721874	4,66886921
22	4,88435255	4,88075206	2,51127657	4,79024127
23	5,00526631	5,00157101	2,57300287	4,90945716
24	5,12383595	5,12004779	2,63616292	5,02492431
25	5,24020191	5,23632269	2,69458981	5,13972341
26	5,35449093	5,35052237	2,75239505	5,25363219
27	5,46681793	5,46276165	2,80827378	5,3635191
28	5,57728747	5,57314499	2,86595025	5,47163981
29	5,68599504	5,68176779	2,92099769	5,57829859
30	5,79302809	5,78871745	2,97457012	5,68210089

MODELO B

AÑOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
1	2,659857	5,980875	0,057721	0,082666
2	5,470041	12,839145	0,112865	0,161513
3	8,458039	20,989552	0,168039	0,240423
4	11,654966		0,223244	0,319394
5	15,101683		0,278479	0,398429
6	18,853569		0,333745	0,477526
7	22,988713		0,389041	0,556686
8			0,444368	0,635908
9			0,499726	0,715194
10			0,555115	0,794544
11			0,610534	0,873956
12			0,665985	0,953432
13			0,721466	1,032972
14			0,776978	1,112576
15			0,832522	1,192244
16			0,888096	1,271976
17			0,943702	1,351772
18			0,999339	1,431633
19			1,055007	1,511558
20			1,110706	1,591548
21			1,166437	1,671604

22			1,222199	1,751724
23			1,277992	1,831910
24			1,333817	1,912161
25			1,389674	1,992477
26			1,445562	2,072860
27			1,501482	2,153308
28			1,557434	2,233823
29			1,613417	2,314404
30			1,669432	2,395051

AÑOS	CASO 5	CASO 8	CASO 9	CASO 10
1	0,104022	0,102924	0,116387	0,101311
2	0,210070	0,202379	0,233494	0,203150
3	0,316343	0,302032	0,350877	0,305198
4	0,422843	0,401885	0,468537	0,407455
5	0,529572	0,501938	0,586476	0,509922
6	0,636530	0,602194	0,704695	0,612601
7	0,743719	0,702651	0,823196	0,715492
8	0,851140	0,803313	0,941982	0,818597
9	0,958794	0,904179	1,061052	0,921917
10	1,066683	1,005251	1,180411	1,025453
11	1,174808	1,106530	1,300058	1,129206
12	1,283170	1,208017	1,419996	1,233177
13	1,391770	1,309712	1,540226	1,337368
14	1,500610	1,411618	1,660751	1,441779
15	1,609691	1,513734	1,781573	1,546412
16	1,719014	1,616063	1,902692	1,651267
17	1,828581	1,718606	2,024111	1,756347
18	1,938394	1,821362	2,145831	1,861652
19	2,048452	1,924334	2,267856	1,967183
20	2,158759	2,027523	2,390185	2,072942
21	2,269315	2,130930	2,512822	2,178930
22	2,380122	2,234556	2,635769	2,285149
23	2,491180	2,338402	2,759027	2,391598
24	2,602493	2,442469	2,882598	2,498281
25	2,714060	2,546758	3,006484	2,605197
26	2,825884	2,651272	3,130688	2,712349
27	2,937966	2,756010	3,255211	2,819737
28	3,050307	2,860974	3,380055	2,927363
29	3,162909	2,966166	3,505223	3,035228
30	3,275774	3,071586	3,630716	3,143334

MODELO C

AÑOS	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
1	2,653003	5,752096	0,057767	0,082759
2	5,372986	11,833546	0,112985	0,161756
3	8,168857	18,304000	0,168263	0,240879
4	11,047200	25,243871	0,223604	0,320128
5	14,015594		0,279005	0,399503
6	17,082834		0,334469	0,479004
7	20,259223		0,389994	0,558633
8			0,445581	0,638389
9			0,501230	0,718274
10			0,556941	0,798287
11			0,612715	0,878430
12			0,668552	0,958702
13			0,724452	1,039105
14			0,780414	1,119639
15			0,836440	1,200304
16			0,892529	1,281101
17			0,948682	1,362031
18			1,004898	1,443093
19			1,061178	1,524289
20			1,117523	1,605620
21			1,173932	1,687085
22			1,230405	1,768685
23			1,286943	1,850421
24			1,343545	1,932293
25			1,400213	2,014302
26			1,456946	2,096449
27			1,513744	2,178734
28			1,570608	2,261157
29			1,627538	2,343720
30			1,684533	2,426423

AÑOS	CASO 5	CASO 8	CASO 9	CASO 10
1	0,103891	0,102782	0,116173	0,101119
2	0,209668	0,201997	0,232927	0,202659
3	0,315557	0,301311	0,349818	0,304301
4	0,421558	0,400724	0,466846	0,406048
5	0,527672	0,500236	0,584011	0,507898
6	0,633899	0,599848	0,701313	0,609852
7	0,740240	0,699559	0,818755	0,711911
8	0,846694	0,799370	0,936335	0,814074
9	0,953263	0,899282	1,054055	0,916343

10	1,059946	0,999294	1,171914	1,018717
11	1,166744	1,099407	1,289914	1,121197
12	1,273657	1,199622	1,408055	1,223783
13	1,380686	1,299938	1,526337	1,326475
14	1,487831	1,400355	1,644761	1,429274
15	1,595093	1,500875	1,763328	1,532181
16	1,702471	1,601498	1,882037	1,635194
17	1,809966	1,702223	2,000890	1,738316
18	1,917579	1,803051	2,119887	1,841545
19	2,025310	1,903983	2,239029	1,944884
20	2,133159	2,005019	2,358315	2,048330
21	2,241127	2,106158	2,477747	2,151886
22	2,349214	2,207402	2,597325	2,255552
23	2,457421	2,308751	2,717050	2,359327
24	2,565747	2,410205	2,836922	2,463213
25	2,674194	2,511764	2,956942	2,567209
26	2,782761	2,613428	3,077109	2,671315
27	2,891450	2,715199	3,197426	2,775534
28	3,000260	2,817076	3,317892	2,879863
29	3,109192	2,919060	3,438508	2,984305
30	3,218246	3,021151	3,559275	3,088859