



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Título del trabajo : “Evaluación de distintos modelos de vida de baterías de ión litio en sistemas eléctricos aislados y conectados a la red”

Autor/es

Carlos Jesús Godoy Aguilar

Director/es

Rodolfo Dufo López / Raúl Igual Catalán

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2021

Resumen

La correcta estimación de la vida de las baterías de ión de litio, es esencial tanto en aplicaciones estacionarias como en los vehículos eléctricos, que cada vez son más comunes. Conocer el envejecimiento de las baterías de ión de litio permitirá estimar los costes del ciclo de vida, favoreciendo el desarrollo de estas tecnologías. En este trabajo se incluye una recopilación bibliográfica de los métodos existentes para la estimación de la vida de las baterías de ión de litio en función de los ciclos de carga, ciclos de descarga y de otras variables. Se han analizado artículos científicos y tesis doctorales.

A partir de las fuentes analizadas, se han implementado los varios modelos existentes para la estimación de la vida útil de las baterías. Cada uno de los modelos realizados, se han aplicado a la simulación de sistemas fotovoltaicos autónomos y conectados a la red eléctrica, haciendo uso del programa Microsoft Excel.

Posteriormente, se han estudiado diferentes casos, combinando diferentes modelos bajo estudio. Finalmente se analizan los resultados obtenidos, para determinar qué modelos se adaptan mejor a los casos de estudio.

Abstract

The correct estimation of the life of lithium-ion batteries is essential both in stationary applications and in electric vehicles, which are becoming increasingly common. Knowing the ageing of lithium-ion batteries will allow the estimation of life cycle costs, favouring the development of these technologies. This work includes a bibliographic compilation of existing methods for estimating the life of lithium-ion batteries as a function of charge cycles, discharge cycles and other variables. Scientific articles and doctoral theses have been analysed.

Based on the sources analysed, the various existing models for estimating the useful life of the batteries have been implemented. Each one of the models made has been applied to the simulation of autonomous and grid-connected photovoltaic systems, using the Microsoft Excel program.

Subsequently, different cases have been studied, combining different models under study. Finally, the results obtained are analysed to determine which models are best suited to the cases under study.

Índice de contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Objetivos.....	1
3.	Estado de la técnica	1
3.1	Introducción.....	1
3.2	Funcionamiento de las baterías Ion-Litio.....	2
3.3	Materiales de las baterías Ion-Litio.....	3
3.3.1	Materiales activos del electrodo: el electrodo negativo	3
3.3.2	Materiales activos del electrodo: el electrodo positivo	3
3.3.3	Electrolitos.....	4
3.4	Aplicaciones	4
3.4.1	Sistemas autónomos basados en fuentes renovables	4
3.4.2	Sistemas conectados a la red	5
3.5	Envejecimiento de las baterías	6
3.5.1	Envejecimiento de las baterías de ion de litio.....	7
3.5.2	Consecuencias del envejecimiento en las baterías de ion de litio	8
3.6	Reciclaje de baterías de iones de litio.....	9
3.7	Conclusión	9
4.	Explicación de los modelos	9
4.1	Modelos por ciclo de vida	9
4.1.1	Modelo A.....	9
4.1.2	Modelo B.....	11
4.1.3	Modelo C.....	12
4.1.4	Modelo D.....	13
4.2	Modelos por calendario.....	14
4.2.1	Modelo E	14
4.2.2	Modelo F	15
4.2.3	Modelo G.....	17
4.3	Combinaciones	18
4.4	Comparación mediante el método de ciclo equivalente	18
5.	Casos de estudio	19
6.	Resultados.....	22
6.1	Modelos	22
6.1.1	Comparación Caso A	22
6.1.2	Comparación Caso B.....	24
6.2	Combinaciones	26
6.2.1	Comparación Caso A	26
6.2.2	Comparación Caso B.....	27
6.3	Comparación mediante el método de ciclo equivalente	29
7.	Conclusión.....	29
8.	Referencias	30

Índice de anexos

1.	Anexo I: Modelo A	I
1.1	Caso A.....	II
1.2	Caso B	IV
2.	Anexo II: Modelo B	V

2.1	Caso A y B	V
3.	Anexo III: Modelo C	VI
3.1	Caso A y B	VI
4.	Anexo IV: Modelo F	VII
4.1	Caso A y B	VII
5.	Anexo V: Modelo G.....	VIII
5.1	Caso A y B	VIII
6.	Anexo VI: Combinaciones	IX
6.1	Caso A y B	IX
7.	Anexo VII: Comparación mediante el método de ciclo equivalente.....	X
8.	Anexo VIII: Resultados	XI
8.1	Resultados Modelo A.....	XI
8.1.1	Caso A.....	XI
8.1.2	Caso B.....	XII
8.1.3	Comparación Caso A y Caso B	XIV
8.2	Resultados Modelo B.....	XIV
8.2.1	Caso A.....	XIV
8.2.2	Caso B.....	XIV
8.3	Resultados Modelo C.....	XV
8.3.1	Caso A.....	XV
8.3.2	Caso B.....	XVI
8.3.3	Comparación Caso A y Caso B	XVII
8.4	Resultados Modelo F	XIX
8.4.1	Caso A.....	XIX
8.4.2	Caso B.....	XXI
8.4.3	Comparación Caso A y Caso B	XXIII
8.5	Resultados Modelo G	XXIV
8.5.1	Caso A.....	XXIV
8.5.2	Caso B.....	XXVI
8.5.3	Comparación Caso A y Caso B	XXIX
8.6	Resultados Combinación modelos A y F	XXX
8.6.1	Caso A.....	XXXI
8.6.2	Caso B.....	XXXII
8.7	Resultados Combinación modelos A y G	XXXII
8.7.1	Caso A.....	XXXII
8.7.2	Caso B.....	XXXIII
8.7.3	Comparación Caso A y Caso B	XXXV
8.8	Resultados Combinación modelos B y F	XXXVI
8.8.1	Caso A.....	XXXVI
8.8.2	Caso B.....	XXXVII
8.9	Resultados Combinación modelos B y G	XXXVIII
8.9.1	Caso A.....	XXXVIII
8.9.2	Caso B.....	XXXIX
8.10	Resultados Combinación modelos C y F	XL
8.10.1	Caso A.....	XL
8.10.2	Caso B.....	XLI
8.10.3	Comparación Caso A y Caso B	XLIII
8.11	Resultados Combinación modelos C y G	XLIV
8.11.1	Caso A.....	XLIV
8.11.2	Caso B.....	XLV
8.11.3	Comparación Caso A y Caso B	XLVI

8.12	Comparación modelo A con modelo de Fabricante	XLVII
8.12.1	Caso A.....	XLVII
8.12.2	Caso B.....	XLVII
8.13	Comparación modelo B con modelo de Fabricante	XLVII
8.13.1	Caso A.....	XLVII
8.13.2	Caso B.....	XLVII
8.14	Comparación modelo C con modelo de Fabricante	XLVIII
8.14.1	Caso A.....	XLVIII
8.14.2	Caso B.....	XLVIII
8.15	Comparación modelo F con modelo de Fabricante.....	XLVIII
8.15.1	Caso A.....	XLVIII
8.15.2	Caso B.....	XLVIII
8.16	Comparación modelo G con modelo de Fabricante	XLVIII
8.16.1	Caso A.....	XLVIII
8.16.2	Caso B.....	XLVIII

Índice de tablas

Tabla 1: C-rates en función de la Tasa C.....	11
Tabla 2: Valores ecuación modelo 2.....	12
Tabla 3: Datos de perfiles del Modelo C.....	12
Tabla 4: Valores z y σ función obtenidos en el paso 1	13
Tabla 5: Valores de los parámetros α y β	13
Tabla 6: Fórmula según el perfil [11].....	13
Tabla 7: Parámetros del Modelo F para dos tipos de baterías distintos	17
Tabla 8: Parámetros del modelo A	20
Tabla 9: Parámetros del modelo B	20
Tabla 10: Parámetros del modelo C	20
Tabla 11: Parámetros del modelo F	20
Tabla 12: Parámetros del modelo G.....	20
Tabla 13: Parámetros combinaciones.	21
Tabla 14: Parámetros ciclo equivalente	21
Tabla 15: Resultados Modelo B Caso A.	24
Tabla 16: Resultados Modelo B Caso B.	25
Tabla 17: Resultados Combinación Modelo A y F. Caso B.....	28
Tabla 18: Resultados Combinación Modelos B y F. Caso B.	28
Tabla 19: Resultados Combinación Modelos B y G. Caso B.....	28
Tabla 20: Ciclo equivalente Fabricante/Modelos Caso A y Caso B.....	29

Índice de figuras

Figura 1: Ilustración esquemática de baterías Ion-Litio	1
Figura 2: Esquema de célula ion litio.....	2
Figura 3: Sistema eólico con baterías.....	5
Figura 4: Instalación renovable conectada a red	6
Figura 5: Causas y efectos de los diferentes mecanismos de degradación.....	7
Figura 6: Matriz de prueba del modelo A.....	10
Figura 7: Esquema del caso A.....	19
Figura 8: Esquema del caso B.....	19
Figura 9: Resultados % Qloss Vs Ciclos. Modelos Caso A.	23
Figura 10: Resultados % Vida Cell Vs Años. Modelos Caso A.	23
Figura 11:Resultados % Qloss Vs Ciclos. Modelos Caso B.	25
Figura 12: Resultados % Vida Cell Vs Años. Modelos Caso B.	25
Figura 13:Resultados % Qloss Vs Ciclos Combinaciones. Caso A.....	26
Figura 14: Resultados % Vida Cell Vs Años Combinaciones. Caso A.....	27
Figura 15:Resultados % Qloss Vs Ciclos Combinaciones. Caso B.....	28
Figura 16: Resultados % Vida Cell Vs Años Combinaciones. Caso B.....	28

1. Introducción

El enfoque principal de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es evaluar el envejecimiento de las baterías de litio en sistemas fotovoltaicos conectados o aislados de la red. Las baterías son uno de los componentes más críticos de las instalaciones. Por tanto, resulta especialmente interesante estudiar su degradación, ya que el tiempo de vida puede llegar a comprometer la viabilidad de la instalación. Este es un tema de máxima actualidad y prueba de ello son los numerosos estudios científicos publicados recientemente en este ámbito.

2. Objetivos

En este TFM se pretende comparar distintos modelos de vida de baterías de ion de litio, tanto modelos de ciclado como de calendario, con el fin de poder cuantificar correctamente la duración de este tipo de baterías en sistemas eléctricos.

Para ello, se revisará y recopilará información de diversas fuentes y artículos científicos. Estos artículos servirán como base para realizar la comparativa, que se llevará a cabo implementando diferentes modelos en sistemas fotovoltaicos aislados y conectados a la red, donde se analizará el envejecimiento previsto por cada modelo. Para ello se utilizará el software Excel.

Posteriormente, se compararán los resultados obtenidos por los distintos modelos de envejecimiento de baterías de ión de litio, obteniendo conclusiones acerca de su viabilidad.

3. Estado de la técnica

3.1 Introducción

El almacenamiento eficiente de la energía es de vital importancia para la transición energética hacia las fuentes de energía renovable. Por ello, el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía electroquímica desempeñan un papel principal a la hora de lograr este objetivo. A día de hoy, las baterías de ion litio son la tecnología elegida para la gran mayoría de las aplicaciones debido a su altísima densidad energética y potencia, su alta seguridad y el descenso continuo en los costes.

El término conocido como “baterías de iones de litio” no define componentes específicos, sino que hace referencia al mecanismo de almacenamiento. En dicho proceso intervienen iones de litio que van y vienen entre el electrodo positivo y negativo, que sirven como matrices de acogida para estos cationes. Por ello, la elección de los materiales electroquímicamente activos e inactivos determinan los parámetros, haciendo que este tipo de baterías sean una tecnología muy versátil. En la [figura 1](#) se ve de forma esquemática esta técnica [1].

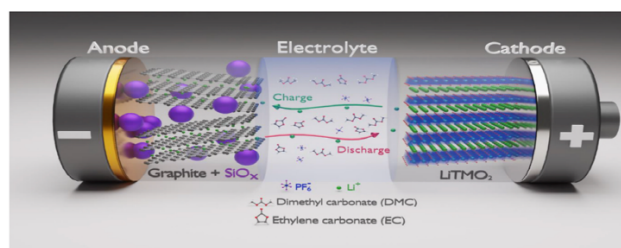


Figura 1: Ilustración esquemática de baterías Ion-Litio [1].

A pesar de que estas baterías presentan características ventajosas, su vida útil es limitada. Hasta ahora las baterías se han utilizado para una sola tarea exclusivamente, pero se está

desarrollando la idea de que las baterías puedan ser utilizadas en distintas tareas o que se les consideren una segunda vida. Por ejemplo, se puede considerar el caso del vehículo eléctrico, donde la batería, además de mover el vehículo, puede proporcionar servicios de red, aspecto que hay que tener en cuenta a la hora de prever su vida útil. Otro ejemplo estaría en el ámbito del transporte, donde las demandas de energía y potencia son altas y se estima que el final de la vida útil se alcanza cuando la batería se degrada hasta el 80% de su capacidad original. Por tanto, todavía hay capacidad para que la batería pueda utilizarse de nuevo en un contexto menos exigente [2].

3.2 Funcionamiento de las baterías Ion-Litio

Una célula de batería de ion litio está formada por un electrodo positivo, un electrodo negativo, un separador entre los electrodos y un electrolito que se extiende por toda la batería. En la [figura 2](#) se puede ver el esquema de una célula de ion de litio [2].

El funcionamiento de la batería consta de dos procesos: la descarga y la carga de la batería. En el proceso de descarga, los iones de litio se desintercalan del electrodo negativo pasando por el electrolito y se intercalan en el electrodo positivo. Al mismo tiempo, los electrones viajan en la misma dirección a través del circuito externo. El proceso de carga se realiza cuando la batería está conectada a una fuente de energía externa. En este caso, los iones de litio abandonan el electrodo positivo y fluyen hacia el electrodo negativo a través del electrolito. Los electrones también fluyen desde el electrodo positivo al negativo por el circuito exterior. Cuando ya no fluyen más iones, la batería se encuentra completamente cargada [2,3]. Por tanto, en el proceso de carga y descarga de la batería, los iones de litio se desplazan de un electrodo al otro. En ambos casos, los electrodos fluyen en dirección opuesta a los iones a través del circuito externo. Los electrones no fluyen a través del electrolito, ya que esta es una barrera aislante muy efectiva que impide la circulación de los electrones a través de él [2,3].

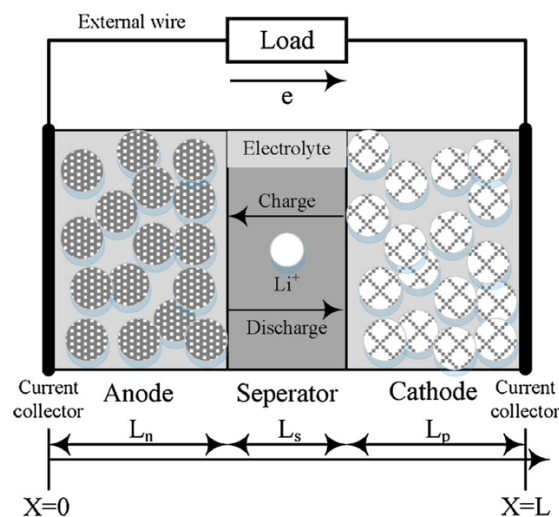


Figura 2: Esquema de célula ion litio [2].

3.3 Materiales de las baterías Ion-Litio

En el apartado anterior se pudo ver de qué partes está formada una batería de ion litio y cómo funciona. En este apartado se tratará de explicar, de forma breve, los materiales empleados para cada una de las partes mencionadas.

3.3.1 Materiales activos del electrodo: el electrodo negativo

Podemos encontrar dos tipos de materiales de inserción que son:

- Grafito: El avance de la tecnología de las baterías de iones de litio fue provocado por la sustitución del metal de litio como material activo del ánodo por compuestos carbonosos, hoy en día principalmente, el grafito [1].
- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (titanato de litio): A pesar del buen rendimiento del grafito, se han encontrado evidencias donde el titanato de litio es fiable para aquellos trabajos donde se requiere una alta potencia [1].

Por otro lado, también podemos encontrar materiales de aleación como son:

- Silicio y óxido de silicio: Este tipo de ánodos ofrecen capacidades específicas mucho más elevadas que los ánodos carbonosos. Por esta razón, los ánodos de silicio han sido ampliamente estudiados y revisados [1].

Tanto el grafito como el titanato de litio son materiales consolidados en la actualidad. Los ánodos de grafito son el estándar industrial para las baterías de iones de litio y se espera que en el futuro se desarrollen pequeñas mejoras. En cuanto a los ánodos de titanato de litio, les espera un destino similar ya que ocupan un nicho en el mercado de la seguridad extrema, como en los dispositivos médicos o el transporte. No obstante, hay que tener en cuenta que el silicio es un candidato muy prometedor para sustituir al grafito, debido a que es abundante, no es tóxico y ofrece unas capacidades gravimétricas y volumétricas altas [1].

3.3.2 Materiales activos del electrodo: el electrodo positivo

Los materiales que podemos encontrar son:

- Fosfatos de metales de transición de litio: Se introdujeron por primera vez como materiales catódicos para las pilas de iones de litio hace más de veinte años. Desde ese momento, se han evaluado una amplia variedad de metales de transición y combinación [1].
- Óxidos de metales de transición de litio: Actualmente, dominan el mercado de las baterías de litio y para un futuro no se espera que cambie la tendencia [1].

3.3.3 Electrolitos

Podemos encontrar dos tipos de electrolitos:

- Electrolitos líquidos: Las baterías de ion de litio actuales emplean una solución orgánica líquida como electrolito. Está formada por hexafluorofosfato de litio como sal conductora y una mezcla de carbonatos lineales y cíclicos[1].
- Electrolitos poliméricos de gel

El electrolito es el componente de la batería con mayor complejidad, pero también donde hay mayor margen de mejora. No cabe duda de que en los próximos años se producirán notables avances en este campo [1].

3.4 Aplicaciones

Inicialmente, las baterías de ion litio se utilizaban para dispositivos móviles, como por ejemplo en la telefonía móvil o en los ordenadores portátiles. No obstante, el interés por esta tecnología ha aumentado considerablemente y ha generado un gran número de investigaciones haciendo que estas baterías penetren en el mercado automovilístico y en las instalaciones renovables ya sean aisladas o conectadas a la red [4].

Este TFM se centrará en las instalaciones con fuentes renovables donde podemos encontrar dos grandes grupos:

- Sistemas autónomos basados en fuentes renovables
- Sistemas conectados a la red

3.4.1 Sistemas autónomos basados en fuentes renovables

Los sistemas autónomos basados en fuentes renovables son aquellos donde el consumo eléctrico deberá ser suministrado mediante un sistema aislado. El almacenamiento de la energía eléctrica sobrante en estos sistemas está formado por baterías de plomo-ácido principalmente. No obstante, cada vez más se están instalando más baterías de ion litio en estos sistemas. Se espera que, debido a la reducción de los costes de adquisición, se implanten de forma generalizada [5].

Los sistemas autónomos más habituales son:

- Sistemas fotovoltaicos con baterías
- Sistemas eólicos con baterías
- Sistemas híbridos fotovoltaico-eólico con baterías
- Sistemas fotovoltaicos, eólicos o híbridos con grupo electrógeno de apoyo y con baterías

En la [figura 3](#), se muestra un sistema eólico con baterías.

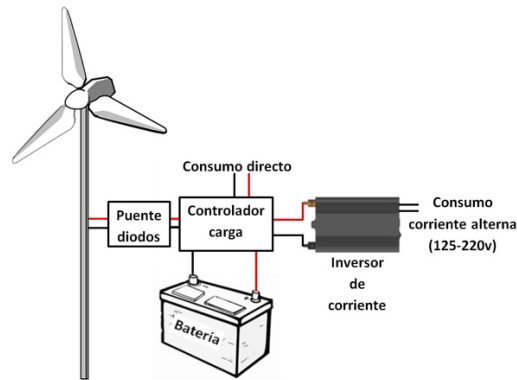


Figura 3: Sistema eólico con baterías [6].

3.4.2 Sistemas conectados a la red

En los sistemas conectados a red las baterías interactúan con la red eléctrica con el fin de optimizar y reducir la factura de la electricidad. Estos sistemas, habitualmente utilizan baterías de ion litio, aunque todavía su rentabilidad precisa de un mayor número de estudios [5].

Los sistemas conectados a red con almacenamiento de baterías pueden ser:

- Sistemas con baterías conectadas a la red con el fin de realizar gestión energética: Las baterías se cargan durante el periodo donde la energía tiene un menor coste, descargándose cuando el coste de la energía es más elevado; reduciendo así la factura eléctrica. Estos sistemas se utilizan para reducir los picos de potencia demandada en la red, siendo así posible reducir la potencia contratada y el término de potencia en la factura eléctrica. Por otro lado, las baterías también pueden utilizarse para realizar servicios auxiliares de red, como son los servicios de reservas de contención de la frecuencia [5].
- Sistemas fotovoltaicos y/o eólicos de autoconsumo o de inyección a red con almacenamiento en baterías: En estos sistemas, la energía sobrante, ya sea del sistema fotovoltaico y/o eólico, puede gestionarse para su almacenamiento en las baterías, de forma que cuando la energía eléctrica tenga un coste alto, las baterías descarguen la energía inyectándola a la red o para que sea utilizada por el consumidor [5].
- Vehículos eléctricos conectados a la red eléctrica: Cuando el vehículo eléctrico se encuentra aparcado y conectado a la red, este puede gestionar la carga y descarga de sus baterías, almacenando la energía cuando esta tiene un coste bajo y suministrándola cuando el coste es alto [5].

En la figura 4, se muestra el esquema de una instalación con producción de energía solar y eólica y conectada a la red o a un grupo electrógeno, donde podemos ver que el sistema se encuentra equipado con baterías.

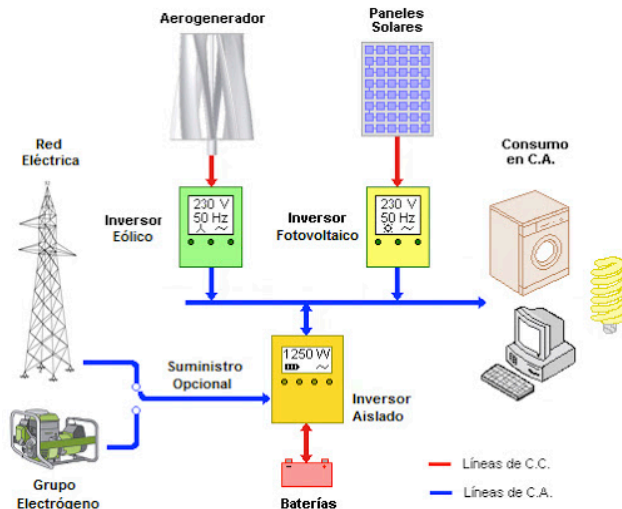


Figura 4: Instalación renovable conectada a red [7].

3.5 Envejecimiento de las baterías

La duración de las baterías es el factor clave para determinar la rentabilidad de la instalación, en el caso de que el sistema esté conectado a la red o para reducir el coste total del sistema, en caso de la instalación esté aislada de la red. El coste de las baterías, incluyendo sus reemplazamientos es el coste más elevado de los componentes que componen el sistema. Es vital estimar correctamente cuánto van a durar las baterías ya que el número de reemplazamientos a lo largo de la vida del sistema dependerá de dicha duración, dando lugar a un mayor o menor coste [5].

La vida de las baterías se suele considerar que finaliza cuando la capacidad remanente es del 80% de la capacidad nominal. Los fabricantes normalmente garantizan que sus baterías puedan realizar un determinado número de ciclos de carga y descarga con profundidad de descarga del 80%, considerando unas condiciones determinadas de laboratorio [5].

En los sistemas aislados de la red, donde la capacidad tiene que ser elevada para suministrar una determinada autonomía, generalmente de 3 días, lo habitual es que la corriente de carga y descarga sea inferior a la utilizada por el fabricante en los ensayos. Además, las temperaturas suelen ser diferentes a las de los ensayos. Por lo tanto, se puede esperar que la vida útil de las baterías pueda ser inferior a la estimada por el fabricante. Sin embargo, en la revisión literaria realizada en este TFM, la cual se puede encontrar en la bibliografía, se ha comprobado que la mayor parte de los investigadores estiman la vida útil considerando únicamente los ciclos de vida. Para ello utilizan los datos del fabricante, tanto para baterías de plomo-ácido como para baterías de litio; siendo así muy probable sobreestimar la duración real de las baterías hasta en dos o tres veces su vida real [5].

En cuanto a los sistemas conectados a la red, del mismo modo que ocurre con los sistemas aislados, los datos empleados en los ensayos difieren de la realidad. Por lo tanto, la duración real de las baterías puede ser inferior a la estimada utilizando los ciclos de vida que proporciona el fabricante [5].

El fallo más común de las baterías de plomo-ácido es la sulfatación que se produce cuando, durante los largos periodos de tiempo, la batería no está completamente cargada y también cuando permanece parcialmente cargada o completamente descargada. Sin embargo, las baterías de ion litio, en particular las LiFePO_4 y grafito, no necesitan estar completamente

cargadas. Su vida útil incluso llega a aumentar en el caso de que estén cargadas y no lleguen a un estado de carga completa, siendo ésta una gran ventaja frente a las de plomo-ácido. Otra ventaja es el amplio rango de temperaturas de trabajado, su alto rendimiento cíclico, su baja resistencia interna y alta eficiencia. La desventaja es su elevado precio [5].

3.5.1 Envejecimiento de las baterías de ion de litio

La tarea de predecir la vida útil de las baterías de iones de litio es de gran importancia dada la utilidad de estos componentes. El proceso de degradación de las baterías de ion litio es una compleja combinación de procesos que llevan a la disminución de la capacidad y al desvanecimiento de la potencia. La mayoría de estos procesos no pueden estudiarse de forma independiente ya que ocurren simultáneamente en escalas de tiempo similares e interactúan entre sí. Los procesos de envejecimiento pueden dividirse en dos grupos: el envejecimiento durante el uso y durante el almacenamiento; también conocidos como envejecimiento relacionado con la vida del ciclo y con la vida del calendario. En la [figura 5](#), podemos ver las causas y efectos de los diferentes mecanismos de degradación de las baterías de litio [5,8].

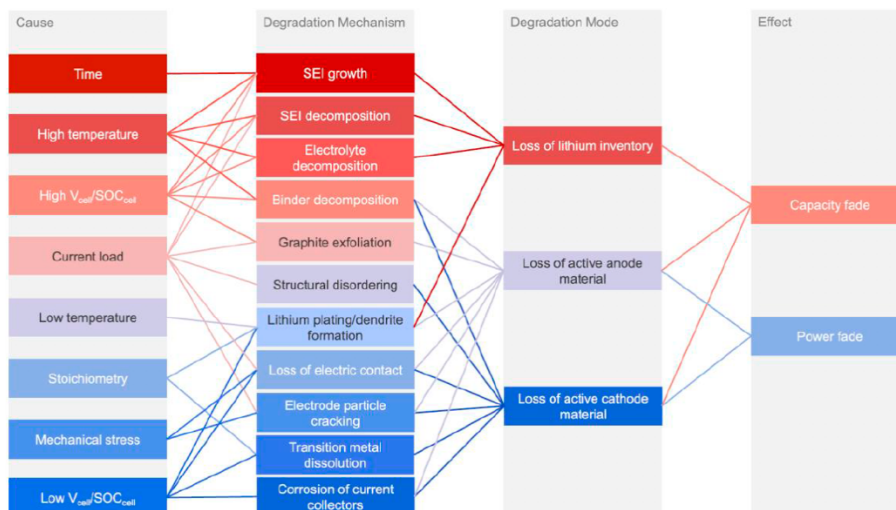


Figura 5: Causas y efectos de los diferentes mecanismos de degradación [8].

Existen muchos métodos para estimar el estado de “salud” de las baterías de litio:

- Métodos de modelos: Encontramos los modelos de circuito equivalente, modelos electroquímicos, modelos matemáticos y los modelos empíricos de degradación [5].
- Métodos de datos: Se incluyen técnicas basadas en inteligencia artificial, redes neuronales, aprendizaje automático, lógica difusa, métodos basados en filtros y métodos basados en series temporales [5].
- Métodos híbridos
- Otros métodos

En aplicaciones de optimización donde se simulan multitud de posibles escenarios con la finalidad de determinar la mejor opción, el proceso de optimización puede durar varias horas. Por este motivo, los modelos empíricos de degradación pueden ser adecuados, ya que no presentan costes computacionales elevados [5].

Como se mencionó con anterioridad, la degradación de las baterías de litio se produce de dos formas:

- Degradación por ciclos de vida: Es una función no lineal de varios parámetros: la carga ciclada (Ah), la profundidad de descarga (DOD), la intensidad de corriente de carga y descarga (I_{bat}), la temperatura (T) y el estado de carga (State of charge – SOC-) [5].

$$Q_{ciclos}=f(Ah, DOD, I_{bat}, T, SOC)$$

Los modelos de degradación por ciclos de vida de baterías de litio se centran en aplicaciones con elevadas intensidades de corriente de carga y descarga, normalmente superiores a la mitad de su capacidad nominal (C/2); en otras palabras, que se realiza cada carga y descarga completa en 2 h. Otros modelos consideran intensidades de corriente de varias veces la capacidad, la energía almacenada desde el inicio de la vida de las baterías, así como distintos regímenes de carga y descarga, la temperatura y, en algunos casos, el efecto del estado de carga. Estos modelos, no funcionan bien para la simulación y optimización de sistemas eléctricos estacionarios [5].

- Degradación por calendario: Es una función no lineal. Depende de la temperatura (T), del tiempo (t) y del estado de carga (SOC) [5].

$$Q_{cal}=g(T,t,SOC)$$

Los modelos de degradación por calendario se utilizan para estimar la vida cuando se encuentran sin utilizar [5].

3.5.2 Consecuencias del envejecimiento en las baterías de ion de litio

En este apartado se identifican los efectos principales del envejecimiento de las baterías de iones litio: son el desvanecimiento de la capacidad y el aumento de la impedancia. Ambos fenómenos se diferencian por causas químicas, por lo que tienen orígenes diferentes. La pérdida de rendimiento, se debe a varios mecanismos físicos, que dependen de los materiales de los electrodos. Las consecuencias de estos mecanismos en las células de iones de litio son [4]:

- Las pérdidas primarias: Hace que se produzca un aumento del desequilibrio de la célula [4].
- Las pérdidas secundarias: Hace referencia a la pérdida de material activo del electrodo. Esto representa una posible disolución del material, una degradación estructural, aislamiento de partículas o a la delaminación del electrodo [4].

En términos de rendimiento tanto las pérdidas primarias como secundarias conducen al desvanecimiento de la capacidad de la batería. En la utilización del vehículo eléctrico, la pérdida de capacidad provoca una reducción de la autonomía. Por otra parte, el aumento de la resistencia reduce la potencia máxima disponible [4].

3.6 Reciclaje de baterías de iones de litio

Cuando la vida útil de una batería llega a su fin hay que decidir qué hacer con la batería usada. Las opciones de reciclaje son: la reutilización o la refabricación de la batería. Hasta ahora, el reciclaje de las baterías de iones de litio se centra en la recuperación de los metales, pero no de los materiales orgánicos. Sin embargo, el reciclaje de las baterías de iones de litio es más complejo que el reciclaje de otro tipos de baterías [8].

En el futuro, es posible que se encuentren mejores químicas y diseños de baterías, lo que permitiría poder fabricar estas baterías de forma uniforme y así poder realizar un reciclaje más sencillo. Disponer de normas industriales estrictas para el reciclaje de baterías garantizaría la calidad de los materiales reciclados [8].

3.7 Conclusión

Se considera que las baterías de iones de litio son la tecnología de baterías preferida para un futuro próximo. A medio plazo, se prevé que sea posible que se produzcan nuevas mejoras significativas [1].

En cuanto el electrodo negativo, se prevé que las mejoras se basen sobre todo en una mayor contribución de silicio en combinación con materiales carbonosos. En el caso del electrodo positivo, se espera que se produzcan nuevas mejoras. A propósito de esto, la importancia cada vez mayor de las baterías de iones de litio, tienen que venir acompañadas de mejoras sustanciales en cuanto a su sostenibilidad. Además, se necesitan urgentemente tecnologías de reciclaje eficaces; por ejemplo, mediante la recuperación directa de los distintos materiales, lo que permitiría su utilización en nuevas baterías de iones de litio. Hay que tener en cuenta que incluso una tasa de reciclaje del 100% tras finalizar la vida útil de la batería, sólo cubrirá una parte menor de la necesidad total de materias primas, dado que la demanda global seguirán aumentando al ritmo actual [1]. Por tanto, habrá que prestar atención a su desarrollo futuro.

4. Explicación de los modelos

En este apartado explicaremos los modelos para estimar la vida útil de las baterías de litio. Se empezarán desarrollando los modelos referidos a la degradación por ciclos de vida y, posteriormente, se continuará con los modelos referidos a la degradación por calendario. Seguidamente, se explicará un método dónde se combinan distintos modelos y el método de ciclo equivalente.

4.1 Modelos por ciclo de vida

En este apartado se presentan los modelos a estudiar, que han sido extraídos a partir de los artículos científicos que se mencionan en el encabezado de cada modelo.

4.1.1 Modelo A

Este modelo hace referencia al artículo científico “Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells” (Wang, J. et al,2011) [9].

El objetivo de este estudio fue estimar la vida útil para las celdas de ion litio de 2,2 Ah de LiFePO₄ con cátodo y ánodo de carbono. Para la realización de este estudio se consideraron diversas condiciones [9]:

- Temperaturas: Desde -30 ° a 60 ° [9].
- Profundidad de descarga: Desde el 90 % a 10% [9].
- Ratios de descarga: C/2, 2C, 6C y 10C [9].

A la hora de definir la profundidad de descarga y los ratios de descarga, se supuso una batería de 2 Ah [9].

La [figura 6](#) representa el número de ciclos que se han alcanzado en las condiciones indicadas. Observamos que las celdas de color rojo han alcanzado el final de su vida útil y las celdas de color verde estaban siendo todavía probadas en el momento de la escritura del artículo [9].

		Temperature °C												
		-30		0		15		25		45		60		C-rate
DOD (%)	90	1	1	2242	2240	2144	2130			1796	1661	754	518	C/2
	80	1	1	2520	2520	2390		2439	563	2120	2123	1011	1006	
	50	13	15	3976	3965	3827	3804			3387	3317	3355	3963	
	20	2662	4979	9625	9652	9234		4711	2211	8374	8379	9801	9821	
	10	9678	12082	18579	18534	18067	17940			16235	16571	19098	19385	
		-30		0		15		25		45		60		2C
90	26	40							4492	4048	1276	1594		
80			2249	1931										
50			2315	2197			3532	3671						
10	38733	29511					3784	6763						
		-30		0		15		25		45		60		6C
90			3795	1207	700	1222								
80			1723	409	480	418			1479	1355				
50	1114	641			4017	8242					1428	1854		
10					5887	9295								
		-30		0		15		25		45		60		10C
90	56	1									274	228		
80			611	1135					683	691				
50			1076	1304			9648	6696						
10	1	1									17511	16848		

■ Test Stopped ■ Test Ongoing

Figura 6: Matriz de prueba del modelo A [9].

Como se puede observar en la [figura 6](#), para altos ratios de descarga elevados (6C o 10), las celdas han llegado al final de su vida útil en un número de ciclos menor en comparación con ratios de descarga más bajos (C/2). Lo mismo ocurre para altas temperaturas. Por tanto, se puede concluir que las altas temperaturas no ayudan a la vida útil de las baterías [9].

Teniendo en cuenta esto, el artículo halla la ecuación que nos permite estimar la pérdida de capacidad de la batería, denominada como modelo de vida, para un ratio de descarga de C/2. No obstante, al realizar los diferentes ensayos, los autores se dieron cuenta de la necesidad de desarrollar una fórmula generalizada que permitiera calcular el desvanecimiento de la capacidad para todas las condiciones, ya que para altas tasas de C el modelo de vida para la tasa C/2 no era preciso. Por lo tanto, se desarrolló el modelo de vida para altas tasas de C, ecuación (1), quedando como ahí se indica [9].

$$Q_{\text{loss}} = B \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times C_{\text{Rate}}}{RT} \right] (A_h^{0,55}) \quad (1)$$

Donde:

- B: Es un factor preexponencial que depende de C_Rate [9].
- R: Es la constante de los gases (8,314 J/mol-K) [9].
- T: Es la temperatura [9].
- A_h : Es el rendimiento total en amperios-hora de la batería. La ecuación (2) muestra cómo se obtiene.

(2)

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

- C_Rate: Representan los ratios de descarga que como se muestran en la [tabla 1](#).

[Tabla 1](#): C-rates en función de la Tasa C [9].

C-rates	Modelo de vida
C/2	31630
2C	21681
6C	12934
10C	15512

4.1.2 Modelo B

Este modelo hace referencia al 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) [10].

En el artículo se menciona que la vida del ciclo de la célula no sólo depende de la tasa de corriente de carga y descarga, de la temperatura y de la profundidad de descarga, sino que también se ve fuertemente afectada por las pausas entre los pasos de carga y descarga. Por tanto, es difícil encontrar una relación empírica para la vida útil de la batería que sea válida para todos los casos de prueba estudiados. Se supuso la ecuación (3) y se encontró que era lo suficientemente válida para ciclos simétricos al 100% de profundidad de descarga, para la temperatura y la tasa de corriente estudiadas. Sin embargo, esta ecuación (3) no puede ser utilizada cuando los ciclos de carga y descarga son asimétricos [10].

(3)

$$Q_{\text{EOL}}[\text{KAh}] = \left(a * e^{b*1} * T^{(c*I^2 + d*I + e)} \right) + f$$

En la [tabla 2](#) se representan los valores de los parámetros.

Tabla 2: Valores ecuación modelo 2 [10].

Parámetros	Valores	Parámetros	Valores
a	3,11	d	-1,12
b	2,81	e	0,687
c	0,0414	f	3,32

Para poder aplicar la ecuación se obtiene la intensidad media anual (I) y la temperatura media anual (T). El resultado de la ecuación (3) es la cantidad de capacidad en KAh capaz de ciclar la batería hasta el final de su vida útil.

4.1.3 Modelo C

Este modelo hace referencia al artículo científico “A control-oriented cycle-life model for hybrid electric vehicle lithium-ion batteries” (Suri, G. et al, 2016) [11].

Este modelo está calibrado con los datos de envejecimiento de la batería obtenidos a partir de un vehículo eléctrico híbrido de carga sostenida. Además, incluye la dependencia del estado de carga, la temperatura y la tasa de corriente. La calibración se realizó con células de grafito LiFePO₄ [11].

El modelo de pérdida de capacidad se identifica utilizando los datos de la tabla 3, donde el perfil A representa el funcionamiento de la batería en condiciones reales de conducción urbana en Gotemburgo, el perfil B muestra el funcionamiento de la batería en un ciclo de carga diseñado sobre un modelo de proceso estocástico para vehículos eléctricos híbridos y, por último, el perfil C es el los resultados de pruebas experimentales de baterías con perfiles de carga de un ciclo de conducción real de un vehículo eléctrico híbrido. Estos 3 perfiles se han aplicado a la batería estudiada y se especifican en términos de estado de carga (SOC), tasa de corriente media (I_c) y temperatura media de la batería (θ̄) [11].

Tabla 3: Datos de perfiles del Modelo C [11].

Datos	SOC [%]	I _c [1/h]	θ̄ [°C]
Perfil A	38,5	2,82	36
Perfil B	42,0	3,00	38
Perfil C	68,0	6,00	45

La ecuación (4) permite conocer la degradación de la vida útil de las baterías [11]:

$$Q_{\text{loss},\%} = (\alpha * \text{SOC} + \beta) \exp\left(\frac{-E_a + \eta * I_c}{R_g * (273,15 + \theta)}\right) \text{Ah}^z \quad (4)$$

Donde:

- α, β: Define la dependencia de SOC [11].
- η: Modela la dependencia de I_c [11].
- R_g: Es la constante universal de los gases [11].

- E_a : Es la energía de activación que es igual a $31,500 \text{ j mol}^{-1}$ [11].

El procedimiento para identificar los parámetros (α , β , η y Z) abarca diversos pasos. El paso 1 identifica los parámetros z y σ_{funct} a partir de los datos de pérdida de capacidad de los tres perfiles. En la [tabla 4](#) se muestran de los parámetros de los tres perfiles. Se observa que los valores de z son cercanos entre sí, por lo que se elige el valor medio $z = 0.54$ [11].

[Tabla 4](#): Valores z y σ_{funct} obtenidos en el paso 1 [11].

Datos	z	σ_{funct}
Perfil A	0,60	0,0347
Perfil B	0,51	0,1000
Perfil C	0,60	0,0578

En el paso 2, se identifican los parámetros α , β y η . Los valores óptimos de α y β se muestran en la [tabla 5](#). Para η , el valor que mejor se ajusta es 152.5 [11].

[Tabla 5](#): Valores de los parámetros α y β [11].

Datos	α (SOC)	β (SOC)
SOC [%] < 45	2896,6	7411,2
SOC [%] \geq 45	2694,5	6022,2

Por otro lado, también se puede calcular la pérdida de vida de la batería de la forma que se muestra en la [tabla 6](#).

[Tabla 6](#): Fórmula según el perfil [11].

Datos	Modelo
Perfil A	$Q_{\text{loss}} = 0,0480 * Ah^{0,57}$
Perfil B	$Q_{\text{loss}} = 0,0530 * Ah^{0,57}$
Perfil C	$Q_{\text{loss}} = 0,0747 * Ah^{0,57}$

4.1.4 Modelo D

Este modelo hace referencia al artículo científico “Advanced battery techno economics tool” (Hentunen, A. et al,2018) [12].

Este informe plantea la siguiente ecuación (5) para estimar la degradación de la vida útil de la batería [12].

$$D_t^{\text{cyc}}(\Delta\delta_t) = \sum_j d_j^{\text{cyc}} \left(\frac{\Delta e_{t,j}^{\text{dis}}}{E} \right) = \sum_j \left[\Delta\Phi_t \frac{\Delta t P_{t,j}^{\text{dis}}}{e_j} \right] \quad (5)$$

Donde:

- d_j^{cyc} : Representa la degradación marginal causada por el envejecimiento del ciclo en el segmento j (%) [12].
- E: Capacidad energética de la batería (MWh) [12].
- $\Delta e_{t,j}^{dis}$: Es la energía descargada del segmento j (MWh) [12].
- $P_{t,j}^{dis}$: Potencia de descarga del segmento j en el momento t (MW) [12].
- $\Delta\Phi_t$: Inversa de la duración del ciclo [12].
- e_j : Energía del segmento (MWh) [12].

4.2 Modelos por calendario

En este apartado se muestran los modelos a estudiar, que fueron extraídos a partir de los artículos científicos que se mencionan en el encabezado de cada modelo.

4.2.1 Modelo E

Este modelo hace referencia al artículo científico “Advanced battery techno economics tool” (Hentunen, A. et al,2018) [12].

Este informe plantea la siguiente ecuación (6) para estimar la degradación de la vida útil de la batería [12].

$$D^{cal} = \sum_t S_t^{cal} \times S_{\psi,lin}^{cal}(\psi_t) \quad (6)$$

Donde:

- $S_{\psi,lin}^{cal}(\psi_t)$: Es el factor de estrés linealizado del estado de la energía a la vida útil. El cálculo de este parámetro se muestra en la ecuación (7) [12].
- X: Coeficiente de la vida útil del calendario. Se muestra su cálculo en el desarrollo en la ecuación (8) [12].

$$S_{\psi,lin}^{cal} = \left[q_0 + q \frac{1}{2E} [\psi(t) + \psi(t-1)] \right] \quad (7)$$

Donde:

- q_0 : Constante de la función linealizada [12].

- q: Pendiente de la función linealizada [12].
- E: Capacidad energética de la batería (MWh) [12].
- ψ : Estado de la energía en el momento t (%) [12].

(8)

$$X = \frac{1}{T_{\text{life}} N_{\text{d-y}} N_{\text{h-d}} N_{\text{ts-h}}}$$

Donde:

- T_{life} : Duración de la batería [12].
- $N_{\text{d-y}}$: Número de días en un año [12].
- $N_{\text{h-d}}$: Número de horas en un día [12].
- $N_{\text{ts-h}}$: Número de pasos de tiempo en una hora [12].

4.2.2 Modelo F

Este modelo hace referencia al artículo científico “Development of an empirical aging model for li-ion batteries and application to assess the impact of vehicle-to-grid strategies on battery lifetime” (Petit, M. et al, 2016) [13].

La peculiaridad de este modelo, es que se aplicará una ecuación para calcular el desvanecimiento de capacidad por calendario o por ciclo. La expresión (1) hace referencia a que cuando la batería está en carga y la corriente es superior, aplicaremos un modelo para calcular la pérdida de capacidad por ciclo. En caso contrario, aplicaremos el modelo por calendario.

(1)

$$\frac{dQ_{\text{loss}}}{dt} = \begin{cases} \frac{dQ_{\text{loss}}^{\text{cal}}}{dt} \rightarrow \bar{I} < I_{\text{cyc}} \\ \frac{dQ_{\text{loss}}^{\text{cyc}}}{dt} \rightarrow \bar{I} > I_{\text{cyc}} \end{cases}$$

El desvanecimiento de la capacidad por ciclo de Petit et al es una expresión (9) que utiliza un enfoque similar al de Wang et al. En ese estudio, la pérdida de capacidad debida al envejecimiento está influida por dos factores de estrés principalmente: la corriente y la temperatura [13,14].

(9)

$$Q_{\text{loss}}^{\text{cyc}} = B_{\text{cyc}} \exp\left(-\frac{E_{\text{a}_{\text{cyc}}} + \alpha|I|}{RT}\right) Ah^{Z_{\text{cyc}}}$$

Donde:

- B_{cyc} : Es un factor pre-exponencial que depende de la corriente, expresado en Ah [13,14].
- Ea_{cal} : Es la energía de activación. Se expresa en J/mol^{-1} [13,14].
- Z_{cyc} : Es una constante adimensional, que debería de estar en torno a 0,5 [13,14].
- T : Es la temperatura [13,14].
- α : Coeficiente de aceleración del envejecimiento debido a la corriente expresada en $J/mol^{-1}A^{-1}$ [13,14].

El desvanecimiento de la capacidad por calendario de Petit et al es una expresión (10) que se basa en la ley de Arrhenius, dependiente de la temperatura, el tiempo y del estado de carga [13,14].

(10)

$$Q_{loss}^{cal} = B_{cal} (SOC) \exp\left(-\frac{Ea_{cal}}{RT}\right) t^{Z_{cal}}$$

Donde:

- B_{cal} : Es un factor pre-exponencial que depende del "SOC" expresado en Ah [13,14].
- Ea_{cal} : Es la energía de activación. Se expresa en J/mol^{-1} . Evalúa la dependencia del envejecimiento del calendario de la temperatura T , expresada en kelvin [13,14].
- Z_{cal} : Es una constante adimensional, que debería de estar en torno a 0,5 [13,14].
- T : Es la temperatura [13].
- t : Hace referencia al tiempo [13].

En este modelo, se utilizaron dos tipos de baterías diferentes cuyos parámetros para el modelo de envejecimiento se muestran en la [tabla 7](#).

Tabla 7: Parámetros del Modelo F para dos tipos de baterías distintos [13].

Datos	A123s 2,3 Ah			Saft VL6P		
Calendario						
	30%	65%	100%	30%	65%	100%
$B_{cal}(SOC)$	$7,43 * 10^5$	$6,75 * 10^5$	$2,18 * 10^5$	$2,78 * 10^5$	$3,80 * 10^5$	$5,43 * 10^5$
$Ea_{cal}(SOC)$ J/mol	73369	69804	56937		52862	
$Z_{cal}(SOC)$	0,943	0,900	0,683		0,52	
Ciclo						
	1 A	4 A	12 A	20 A		
$B_{cyc}(I)$	$3,16 * 10^3$	$2,17 * 10^4$	$1,29 * 10^4$	$1,55 * 10^4$	130	
Ea_{cyc} J/mol	31700			18461		
Z_{cyc}	0,55			0,4		
α_{cyc}	370,3			32		
I_{cyc}	1 I_t			1 I_t		
τ_{filt}	60 s			0 s		

4.2.3 Modelo G

Este modelo hace referencia al artículo científico “Lifetime estimation of the nanophosphate LiFePO₄/C battery chemistry used in fully electric vehicles” (Swierczynski, M. et al,2015) [15].

Para el estudio de este modelo, se han utilizado tres celdas de baterías para cada uno de los casos de prueba. Las células están formada por cátodos de LiFePO₄ y ánodos de grafito. Debido a las limitaciones económicas, se eligieron celdas cilíndricas de pequeño tamaño con una capacidad de 2,5 Ah [15].

El modelo de vida útil se creó a partir de un modelo básico de baterías que se basa en una ecuación potencia-energía y tiene en cuenta la eficiencia de la batería. La ecuación (11) relaciona el desvanecimiento de la capacidad de calendario de la batería en función del tiempo de almacenamiento [15].

$$C_{FADE}(t,T,SOC_{st})=(0,019 * SOC_{st}^{0,823} + 0,5195) * (3,258 * 10^{-9} * T^{5,087} + 0,295) * t^{0,8} \quad (11)$$

Donde:

- SOC_{st} : Es el valor del estado de carga de la batería [15].
- T : Es la temperatura [15].

- t: Hace referencia al tiempo [15].

4.3 Combinaciones

En este apartado se han combinado los diferentes modelos de calendario y ciclo entre sí para ver cómo sería la degradación de la vida útil de la batería en estas condiciones.

Para saber cuándo utilizar un modelo de calendario o de ciclado, se ha puesto la siguiente condición: cuando el C-Rate es mayor que 0,05, se utilizará el modelo por ciclado y, cuando sea menor, se utilizará el modelo por calendario.

Las combinaciones que haremos serán las siguientes:

- Wang, J.et al (modelo A) [9] y Petit, M.et al (modelo F) [13]: En este modelo no se seguirá la relación comentada en este apartado, sino que seguiremos la relación mencionada en el apartado 4.2.2, para replicar el modelo exacto.
- Wang, J.et al (modelo A) [9] y Swierczynski, M.et al (modelo G) [15].
- Groot, J.et al (modelo B) [10] y Petit, M.et al (modelo F) [13].
- Groot, J.et al (modelo B) [10] y Swierczynski, M.et al (modelo G) [15].
- Suri, G.et al (modelo C) [11] y Petit, M.et al (modelo F) [13].
- Suri, G.et al (modelo C) [11] y Swierczynski, M.et al (modelo G) [15].

4.4 Comparación mediante el método de ciclo equivalente

En los modelos basados en ciclos equivalentes se cuenta la carga ciclada de la batería desde el inicio de su vida útil, sin tener en cuenta el SOC, la temperatura, la corriente o cualquier otra variable. El modelo de recuento de ciclos rainflow incluye el efecto de la profundidad de descarga. Sin embargo, las condiciones reales de funcionamiento son diferentes de las condiciones de laboratorio mostradas en la hoja de datos del fabricante, por lo que se podrá apreciar un error significativo en la predicción de la vida útil [4,14].

El objetivo de este apartado es comparar el número de años que tarda en llegar al fin de su vida útil una batería a partir de los datos proporcionados por el fabricante, con los datos obtenidos en los diferentes modelos planteados en este trabajo. Los resultados se podrán ver en el apartado 6.

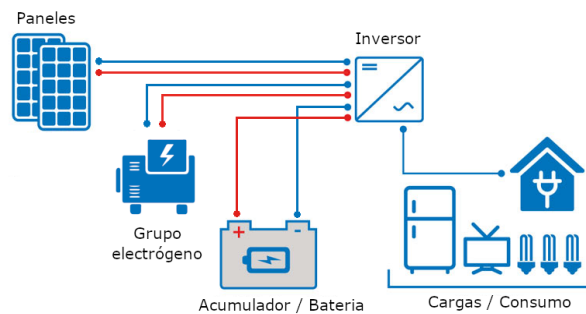
Para poder obtener los resultados se utilizará la métrica expresada en la ecuación (12). Utilizando esa expresión, se pueden estimar los años que tardará una batería en llegar al fin de su vida útil.

$$\text{Años} = \frac{\text{Ciclos según fabricante}}{\text{Ciclos en un año (estimados por el modelo)}} \quad (12)$$

5. Casos de estudio

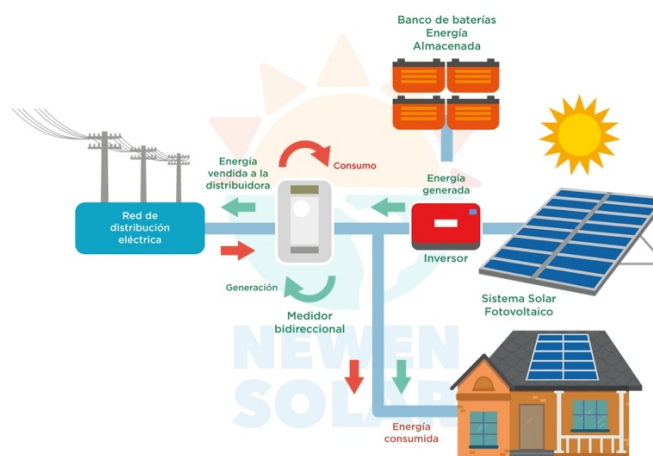
El objetivo de este apartado es conocer la degradación de la vida de las baterías aplicando los modelos vistos en el apartado anterior. Se van a plantear dos situaciones diferentes para cada uno de ellos:

- **Caso A:** Es un sistema aislado de la red. Está formado por un sistema fotovoltaico, baterías y un generador diésel/gasolina. La [figura 7](#) representa el caso a estudiar.



[Figura 7](#): Esquema del caso A [16].

- **Caso B:** Es un sistema conectado a la red. Por lo tanto, el sistema está formado por baterías, la red eléctrica y el sistema fotovoltaico. Este último será 0 ya que la energía la vamos a obtener de la red. La [figura 8](#) representa el caso a estudiar.



[Figura 8](#): Esquema del caso B [17].

Los datos principales que vamos a utilizar para cada uno de los casos son:

- **Baterías:** Se utilizan los modelos propuestos en cada uno de los análisis científicos. En las [tablas 8, 9, 10, 11, 12, 13](#) y [14](#) se muestran las características técnicas de cada una de ellas.

[Tabla 8:](#) *Parámetros del modelo A [9].*

Modelo A	
Parámetros	
Capacidad 1 celda	2,2 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal 1 celda	2 V

[Tabla 9:](#) *Parámetros del modelo B [10].*

Modelo B	
Parámetros	
Capacidad 1 celda	2,3 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Grafito
Tensión nominal 1 celda	3,3 V

[Tabla 10:](#) *Parámetros del modelo C [11].*

Modelo C	
Parámetros	
Capacidad 1 celda	2,5 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Grafito
Tensión nominal 1 celda	3,3 V

[Tabla 11:](#) *Parámetros del modelo F [13].*

Modelo F	
Parámetros	
Capacidad 1 celda	2,2 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal 1 celda	2 V

[Tabla 12:](#) *Parámetros del modelo G [15].*

Modelo G	
Parámetros	
Capacidad 1 celda	2,5 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Grafito
Tensión nominal 1 celda	3,3 V

Tabla 13: Parámetros combinaciones.

Combinaciones	
Parámetros	
Capacidad 1 celda	2,2 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal 1 celda	2 V

Tabla 14: Parámetros ciclo equivalente [19].

Ciclo equivalente	
Parámetros	
Ciclo de vida (DOD %100)	≥2500 ciclos
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono

- Eficiencia del inversor y del cargador: Será del 90%.
- Consumo: Se ha establecido un consumo diario de 3,63 kWh.
- Generador diésel/gasolina: Variará en función del caso en el que estemos:
 - Caso A: Tendrá un valor de 1000W.
 - Caso B: Tendrá un valor de 10000W, ya que la generación fotovoltaica será 0.
- Potencia fotovoltaica: Del mismo modo que ocurría en el punto anterior, en función del caso variará:
 - Caso A: Tendrá un valor de 2000 Wp.
 - Caso B: Tendrá un valor de 0, ya que la generación fotovoltaica será cero.
- Días de autonomía de la batería: Variará en función del caso:
 - Caso A: Tendrá un valor de 4 días.
 - Caso B: Tendrá un valor de 0,1 días.
- Tensión del bus DC: 48 V.
- Irradiación y Temperatura: Parámetros obtenidos a partir de la web de datos PVGIS [18].

A partir de los datos mostrados, se calculan los parámetros necesarios para poder aplicar los diferentes modelos comentados en el epígrafe anterior. Este desarrollo, está explicado en los anexos I, II, III, IV, V, VI y VII de este documento.

6. Resultados

El objetivo de este apartado es mostrar una comparativa de los resultados para cada uno de los casos ya explicados en la memoria, tanto de los modelos (sección 6.1), como de las combinaciones de modelos (sección 6.2) y, por último, la comparativa por ciclo equivalente a partir de los datos proporcionados por el fabricante de la batería (sección 6.3).

Los resultados se han obtenido con el programa de cálculo Excel, que es la herramienta con la que han sido programados los diferentes modelos.

Los resultados se van a mostrar como se explica. Se podrá observar una gráfica comparativa de los modelos contrastando los resultados para los casos A y B. En el apartado donde se compara mediante el método de ciclo equivalente, se expondrá una tabla.

6.1 Modelos

Se van a comparar de forma gráfica cada uno de los modelos realizados, con el objetivo de ver de forma clara, cuál se adapta más a nuestros dos casos de estudios. Las gráficas que se mostrarán serán: “% Qloss Vs Ciclos” y “% Vida Cell Vs Años”.

Por otro lado, se podrá apreciar en dicha comparación que el modelo B no aparecerá. Eso se debe a que los resultados obtenidos para este modelo no tiene sentido compararlos debido al número tan alto de años obtenidos (el modelo no se ajusta a los casos estudiados).

Por último, es importante aclarar dos aspectos. En primer lugar, en cuanto al modelo F se refiere, los resultados que veremos en este apartado, únicamente contemplan la parte del modelo de calendario, ya que como se ha mencionado anteriormente (sección 4.2.2), el artículo científico donde se expone el modelo de Petit, M.et al es una combinación entre dicho modelo y el modelo de ciclado de Wang, J.et al [13]. En segundo lugar, veremos dos resultados del modelo G ya que hemos obtenido los resultados de dos maneras, de forma anual y de forma mensual.

6.1.1 Comparación Caso A

Antes de empezar a comentar las gráficas, podemos ver en la [tabla 15](#) los resultados del modelo B. Vemos que este modelo no tiene sentido considerarlo (por el número tan elevado de años que estima) si no se considera conjuntamente con un modelo de calendario.

En la [figura 9](#), podemos ver la comparación “% Qloss Vs Ciclos”, donde se ha comparado el porcentaje de capacidad perdido en función del número de ciclos. Seguidamente se muestra la [figura 10](#) que representa “% Vida Cell Vs Años”, donde se incluye la evolución de la vida de la batería con el paso de los años, hasta llegar al 80% de su capacidad.

En la [figura 9](#) se puede observar que el número de ciclos realizados por los modelos G y C son bastante parecidos, al igual que ocurre con los modelos A y G. Hay que resaltar que en los modelos G (año) y G (mes), aún siendo el mismo modelo, los resultados bastante diferentes.

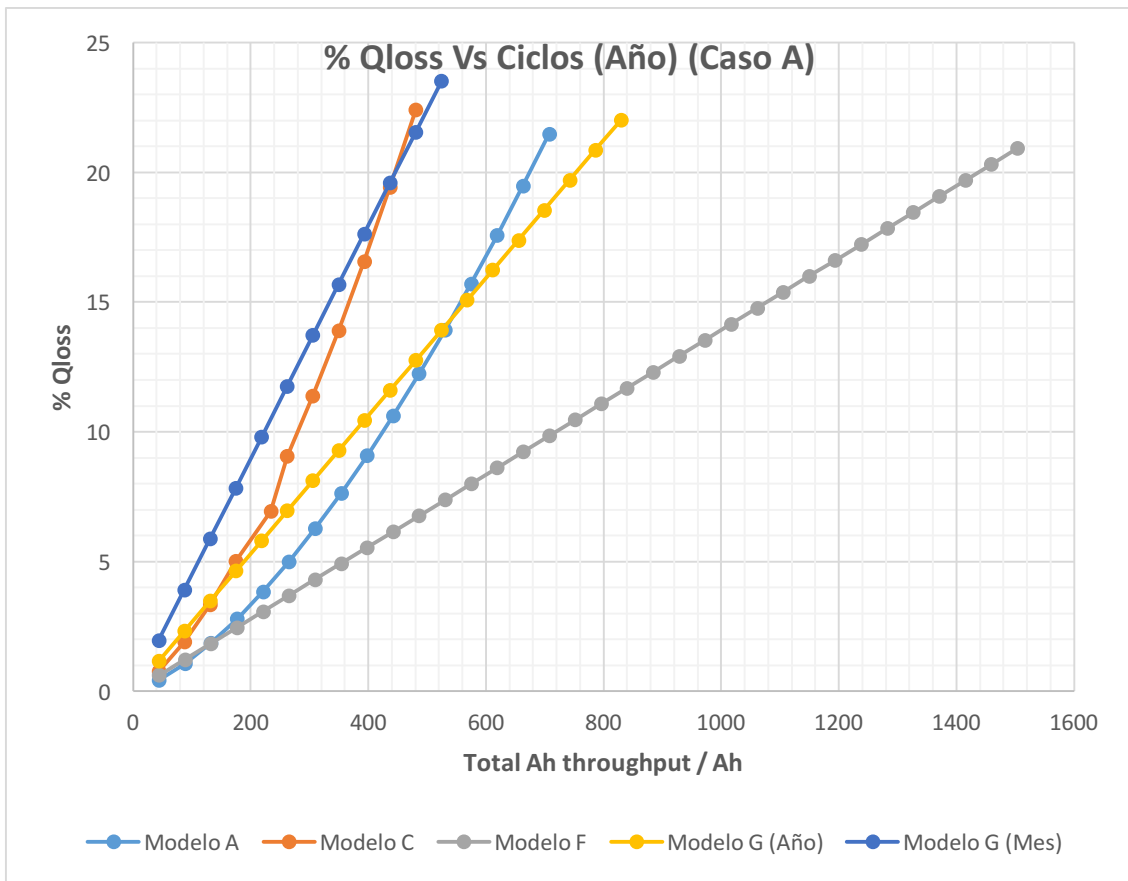


Figura 9: Resultados % Qloss Vs Ciclos. Modelos Caso A.

Viendo la [figura 10](#), es posible hacerse una idea del número de años. A la vista del resultado para el modelo F, es remarcable que resulta poco probable que la batería fuera a durar tantos años. El elevado número de años se debe a las bajas corrientes existentes. A pesar de esto, vemos que todos los modelos tienen una degradación muy parecida. En el Anexo VIII se puede ver de forma numérica la degradación de cada modelo y la representación gráfica de cada uno de ellos de forma independiente.

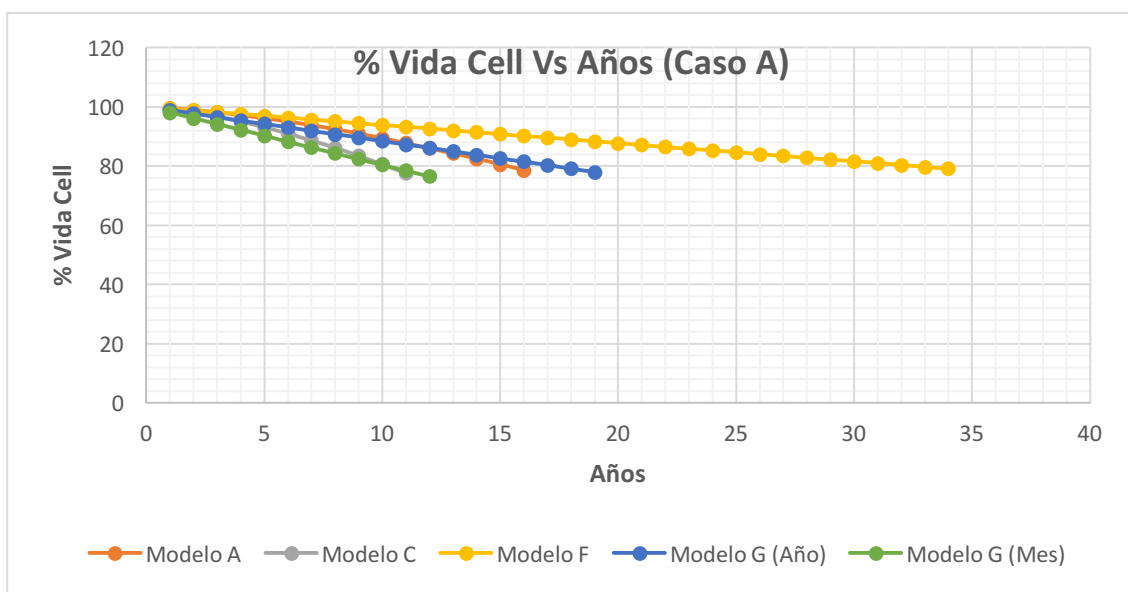


Figura 10: Resultados % Vida Cell Vs Años. Modelos Caso A.

[Tabla 15](#): Resultados Modelo B Caso A.

Año	KAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
1	22,27	221

6.1.2 Comparación Caso B

Del mismo modo que ocurría en el apartado anterior, la [tabla 16](#) muestra el resultado del modelo B. Se observa que nuevamente es un valor irreal y no tendría sentido contemplar este valor, por lo elevado que es.

En la [figura 11](#) podemos ver la comparación “% Qloss Vs Ciclos”, donde se ha comparado el porcentaje de capacidad perdido en función del número de ciclos. Por su parte, la [figura 12](#) representa “% Vida Cell Vs Años”, mostrando la evolución de la vida de la batería con el paso de los años, hasta llegar al 80% de su capacidad.

En la [figura 11](#) podemos ver que los modelos de ciclado no se adaptan bien a los sistemas conectados a la red, ya que vemos que se llega muy rápido a ese 20 % de pérdida de capacidad. Como se observa en la [figura 12](#), la durabilidad de estas baterías está entre 2 y 3 años para los modelos A y C. Esto se debe a que, para corrientes altas, estos modelos se adaptan bien, pero las condiciones del caso B no son las mejores para ellos y de ahí al bajo número de años estimados. En cambio, en el modelos G por calendario se aprecia una buena adaptación. Por su parte, el modelo F, que como ya se comentó al inicio de del apartado 6.1, únicamente se ha tenido en cuenta la parte por calendario, muestra una durabilidad y degradación bastante lenta. En el Anexo VIII se puede ver, de forma numérica, la degradación de cada modelo y la representación gráfica de cada uno de ellos de forma independiente.



Figura 11: Resultados % Qloss Vs Ciclos. Modelos Caso B.

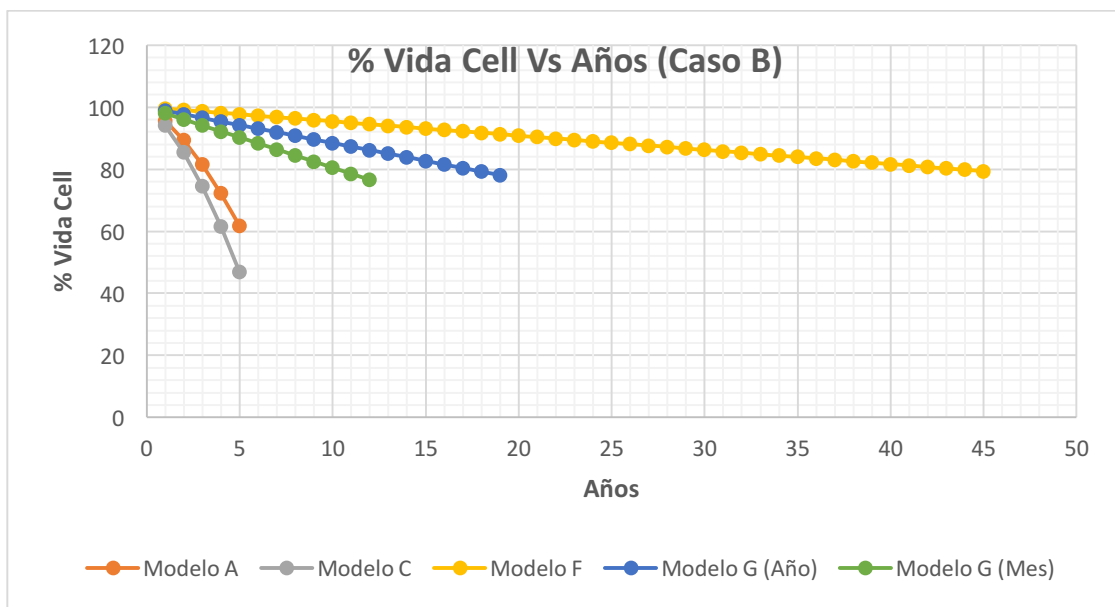


Figura 12: Resultados % Vida Cell Vs Años. Modelos Caso B.

Tabla 16: Resultados Modelo B Caso B.

Año	KAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
1	315,75	54,21

6.2 Combinaciones

De la misma forma que en el apartado anterior, se van a comparar de forma gráfica cada una de las combinaciones realizadas, con el objetivo de ver de forma clara, cuál se adapta más a nuestros dos casos de estudio. Las gráficas que se mostrarán serán: “% Qloss Vs Ciclos” y “% Vida Cell Vs Años”.

Es necesario aclarar que en la combinación de los modelos A y F no se seguirá la relación comentada en el apartado 4.3, sino que se aplicará la relación mencionada en el apartado 4.2.2 para replicar el modelo exacto.

Por otro lado, para los casos A y B, no se van a mostrar todas las combinaciones, ya que no tiene sentido compararlas debido al número tan alto de años obtenidos en algunas de ellas.

6.2.1 Comparación Caso A

En la [figura 13](#), podemos ver la comparación “% Qloss Vs Ciclos”, donde se ha comparado el porcentaje de capacidad perdida en función del número de ciclos. A continuación, la [figura 14](#), “% Vida Cell Vs Años”, representa la evolución de la vida de la batería con el paso de los años, hasta llegar al 80% de su capacidad.

La [figura 13](#) representa 3 combinaciones de modelos únicamente. Esto se debe a que, al tener todas las combinaciones el mismo modelo de batería y las mismas condiciones, únicamente actúa la parte formada por calendario, debido a que las corrientes son muy bajas. De este modo, las combinaciones de los modelos AG, BF y BG se superponen con el modelo CF y CG. Lo mismo pasa con la [figura 14](#). Por tanto, se puede afirmar que estos resultados no tendrían sentido para este caso, ya que lo único que los diferencia es la fórmula aplicada en cada caso. En el Anexo VIII se puede ver de forma numérica la degradación de cada modelo y la representación gráfica de cada uno de forma independiente.

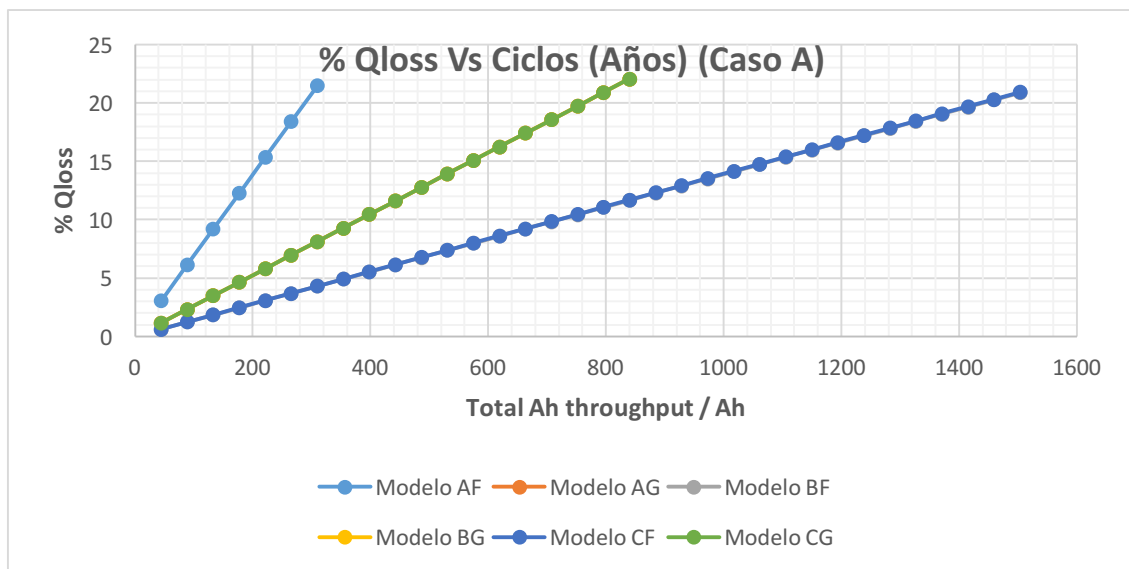


Figura 13: Resultados % Qloss Vs Ciclos Combinaciones. Caso A.

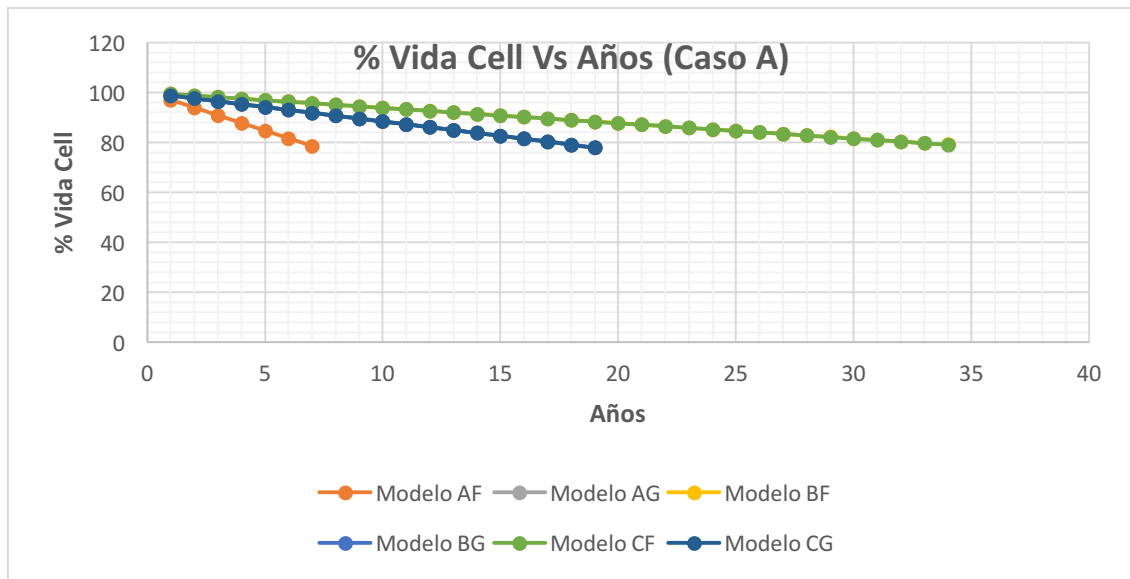


Figura 14: Resultados % Vida Cell Vs Años Combinaciones. Caso A.

6.2.2 Comparación Caso B

Vemos que las combinaciones de modelos AF, BF y BG no aparecen en las gráficas, porque los resultados obtenidos no tienen sentido físico (el tiempo de vida estimado es extremadamente bajo o alto). Las [tablas 17](#), [18](#) y [19](#) muestran los resultados obtenidos: la batería llega al final de su vida útil en un año en el caso de las combinación de los modelos A y F y dura más de cincuenta en las combinaciones de los modelos B y F por un lado y B y G por otro. Esto se debe a las condiciones iniciales dadas para este caso, donde tenemos únicamente una degradación por ciclado, por lo que es innecesario compararlas con el resto de las combinaciones.

La [figura 15](#) compara el porcentaje de capacidad perdido en función del número de ciclos, “Qloss Vs Ciclos”. Por su parte, la [figura 16](#) representa la evolución de la vida de la batería con el paso de los años, hasta llegar al 80% de su capacidad, “% Vida Cell Vs Años”.

En esta situación, vemos que, a diferencia del caso anterior, sí tiene sentido hacer una combinación entre un modelo de ciclado y otro de calendario, ya que, al tener corrientes altas, la parte de ciclado se adapta mejor. Además, recalcar que dan prácticamente lo mismo porque los parámetros iniciales son exactamente iguales para todos. Esto se diferencia de la comparación única de los modelos (sección 5), donde las tensiones nominales y capacidad de las celdas de las baterías eran diferentes. En el Anexo VIII, se puede ver, de forma numérica, la degradación de cada modelo y la representación gráfica de cada uno de ellos de forma independiente.

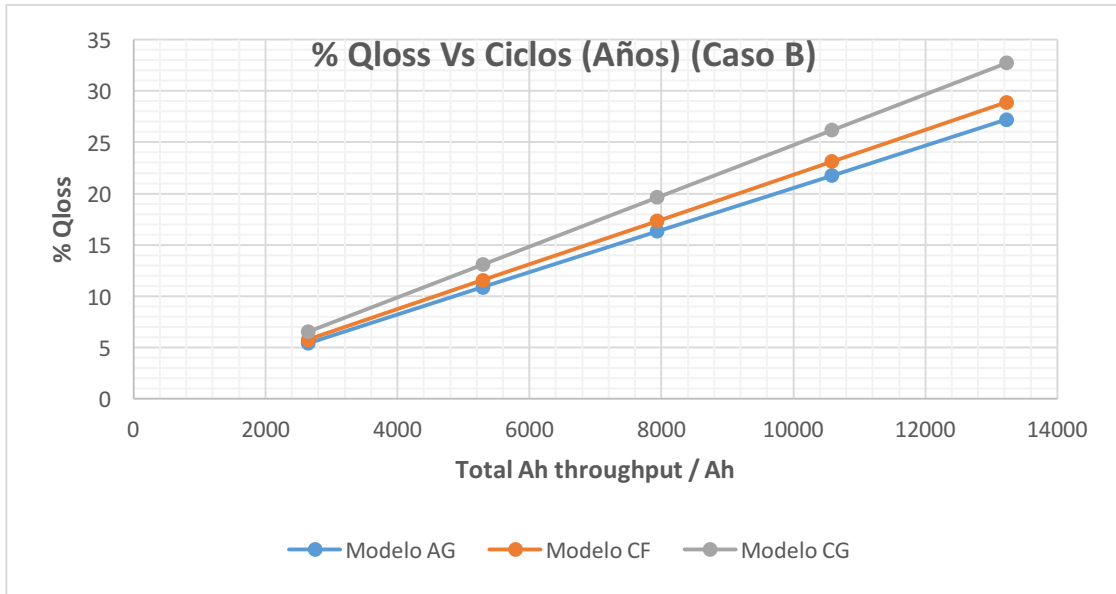


Figura 15: Resultados % Qloss Vs Ciclos Combinaciones. Caso B.

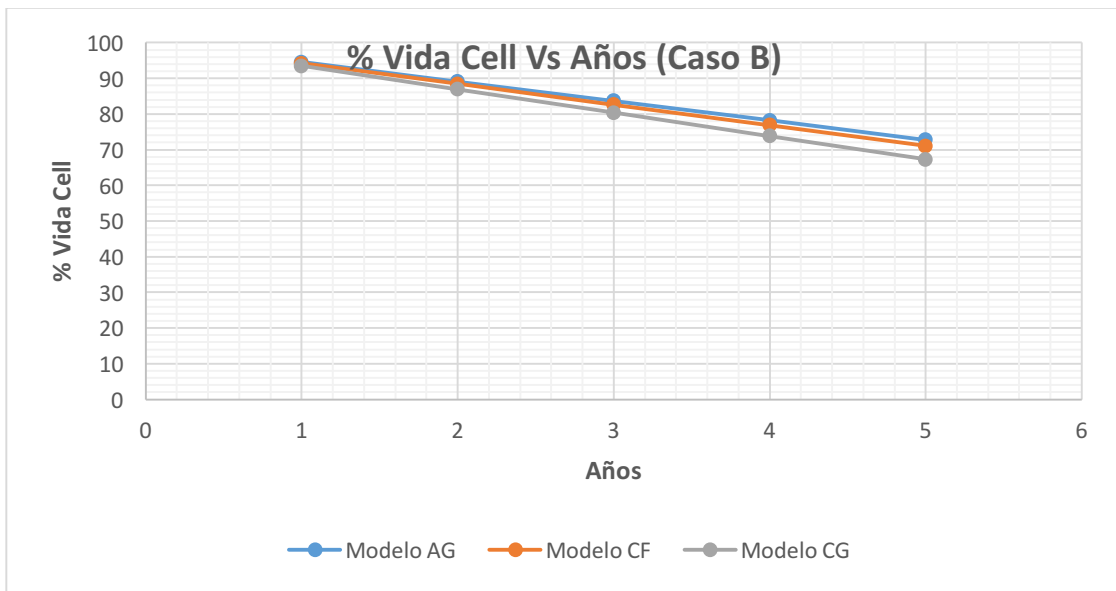


Figura 16: Resultados % Vida Cell Vs Años Combinaciones. Caso B.

Tabla 17: Resultados Combinación Modelo A y F. Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2647,38	43,15	43,15	56,85

Tabla 18: Resultados Combinación Modelos B y F. Caso B.

Años (Calendario)	Años (Ciclo)	Años totales
1	54,21	54,21

Tabla 19: Resultados Combinación Modelos B y G. Caso B.

Años (Calendario)	Años (Ciclo)	Años totales
1	54,21	54,21

6.3 Comparación mediante el método de ciclo equivalente

El objetivo de este apartado es mostrar el número de años obtenidos a partir del método del ciclo equivalente (explicado en el apartado 4.4). La [tabla 20](#) muestra el número de años calculado con este método. Se puede ver que la duración, aplicando este método, es mucho más elevada en el caso A y muy inferior en el caso B. Esto se debe a que este método no contempla ni la temperatura, ni el estado de carga, ni la profundidad de descarga. Además, las condiciones de trabajo son diferentes a las ensayadas, por lo tanto ese valor no es fiable para los dos casos estudiados.

[Tabla 20](#): Ciclo equivalente Fabricante/Modelos Caso A y Caso B.

Ciclos Fabricante	Modelo	Ciclo 1 año Caso A	Años Caso A	Ciclo 1 año Caso B	Años Caso B
2500	A	44,21	56,54	2647,38	0,94
2500	B	43,82	57,05	2532,27	0,99
2500	C	43,71	57,20	2329,69	1,07
2500	F	44,21	56,54	2647,38	0,94
2500	G	43,71	57,20	2329,69	1,07

7. Conclusión

Antes de comentar las conclusiones, es necesario aclarar que cada modelo vale para la batería concreta ensayada. Esto quiere decir que para otra batería con la misma composición pero con diferentes características técnicas, es posible que los resultados obtenidos no sean reales. Además, las baterías han sido ensayadas con unos parámetros determinados y unas condiciones concretas. De ahí que se observe que no todos los modelos se adaptan bien a las condiciones estudiadas.

En cuanto a la aplicación de los modelos, vemos que cuando las corrientes son altas, se adaptan bastante bien para los sistemas conectado a red (caso B). En cambio, cuando el sistema está aislado de la red (caso A), los modelos por ciclado no se adaptan del todo bien, ya que la durabilidad de la batería es muy corta, teniendo poco sentido físico este resultado. Por lo que respecta al modelo B, vemos que es un modelo que no se puede aplicar para ninguno de los dos casos; es necesario que este modelo se pueda complementar con una parte de degradación por calendario para que se pueda ajustar mejor a estos casos de estudio.

En cuanto a la combinación de modelos, vemos que es la opción que proporciona resultados más coherentes al contemplar tanto estimación por calendario como por ciclado. En el caso A (sistema aislado de la red) la combinación de los modelos C y G proporciona resultados lógicos. Lo mismo ocurre para el caso B (sistema conectado a la red) para la combinación de los modelos AG, CF y CG.

Por último, en cuanto a la comparación mediante al método de ciclo equivalente, se concluye que no es fiable realizar una estimación de la vida útil de la batería por este método, ya que las condiciones de trabajo con las que se han obtenido estos resultados son muy diferentes a las requeridas por los casos contemplados en este TFM (sistemas aislados y conectados a la red). Por tanto, es probable que la durabilidad de la batería sea mucho menor.

Se podría concluir que habría que buscar el equilibrio entre un modelo de pérdida de capacidad por ciclado y de pérdida de capacidad por calendario, teniendo en cuenta que no todos los modelos se adaptarán por igual a las condiciones de ensayo. La realización de más estudios en este ámbito permitiría ampliar las conclusiones obtenidas.

8. Referencias

[1] **Michel Armand, Peter Axmann, Dominic Bresser, Mark Copley, Kristina Edström, Christian Ekberg, Dominique Guyomard, Bernard Lestriez, Petr Novák, Martina Petranikova, Willy Porcher, Sigita Trabesinger, Margret Wohlfahrt-Mehrens, Heng Zhang**, Lithium-ion batteries-Current state of the art and anticipated developments, 2020. Journal of Power Sources, (479), 228708.

[2] **Mehdi Jafari, Khalid Khan, Lucía Gauchia**, Deterministic models of Li-ion battery aging: It is a matter of scale, Deterministic models of Li-ion battery aging: It is a matter of scale, 2018. Journal of Energy Storage, (20), 67-77.

[3] **Estudio del funcionamiento de las baterías de Ion Litio**, Disponible online: <https://blogs.cdcomunicacion.es/> (acceso en 5/3/21).

[4] **Anthony Barré, Benjamin Deguilhem, Sébastien Grolleau, Mathias Gérard, Frédéric Suard, Delphine Riu**, A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications, 2013. Journal of Power Sources, (241), 680-689.

[5] **Rodolfo Dufo-López**, Revisión del estado del arte (Sistemas autónomos basados en fuentes renovables, sistemas conectados a la red, envejecimiento de las baterías y costes asociados, envejecimiento de las baterías de litio.

[6] **Generatuluz Aerogeneradores**, Disponible online: <https://www.generatuluz.com/generar-electricidad/aerogeneradores/> (acceso en 5/3/21).

[7] **Kliux energies Instalación Aislada**, Disponible online: <http://www.kliux.com/instalaciones/instalacion-aislada/> (acceso en 10/3/21).

[8] **VTT-Samppa Jenu, Aino Manninen, Saara Tuurala, Ari Hentunen**, Simplified state of health diagnostics tool, 2018. Grant agreement, nº 731148.

[9] **John Wang, Ping Liu, Jocelyn Hicks-Garner, Elena Sherman, Souren Soukiazian, Mark Verbrugge, Harshad Tataria, James Musser, Peter Finamore**, Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells, 2010. Journal of Power Sources, (196), 3942-3948.

[10] **Jens Groot, Maciej Swierczynski, Anna Irina Stan, Søren Knudsen Kær**, On the complex ageing characteristics of high-power LiFePO₄/graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents, 2015. Journal of Power Sources, (286), 475-487.

[11] **Girish Suri, Simona Onori**, A control-oriented cycle-life model for hybrid electric vehicle lithium-ion batteries, 2016. Energy, (96), 644-653.

[12] **Ari Hentunen, Juha Forsström, Victor Mukherjee-VTT**, Advanced battery techno economics tool, 2018. Grant agreement, nº731148.

- [13] **Martin Petit, Eric Prada, Valérie Sauvart-Moynot**, Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime, 2016. Applied Energy, (172), 398-407.
- [14] **Rodolfo Dufo-López, Tomás Cortés-Arcos, Jesús Sergio Artal-Sevil, José Luis Bernal-Agustín**, Comparison of Lead-Acid and Li-Ion Batteries Lifetime Prediction Models in Stand-Alone Photovoltaic Systems, 2021. MDPI, 11,1099.
- [15] **Maciej Swierczynski, Daniel-Ioan Stroe, Ana-Irina Stan, Remus Teodorescu, Søren Knudsen Kær**, Lifetime Estimation of the Nanophosphate LiFePO₄/C battery chemistry used in fully electric vehicles, 2015. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.51, n^o4.
- [16] **HelioEsfera Instalación fotovoltaica aislada**, Disponible online: <https://www.helioesfera.com/instalacion-fotovoltaica-aislada/> (acceso en 20/3/21).
- [17] **Ny inversiones Energía solar residencial**, Disponible online: <https://nyinversiones.com/energia-solar-residencial/> (acceso en 20/3/21).
- [18] **European Commission Photovoltaic Geographical Information System**, Disponible online: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/tools.html#HR (acceso en 25/3/21).
- [19] **Autosolar Bateria Litio 12V 22Ah Upower Ecoline** Disponible online: <https://autosolar.es/pdf/Bateria-Litio-UPower-12V-22Ah-UE-12Li22BL.pdf> (acceso en 25/3/21).
- [20] **Saurabh Saxena, Christopher Hendricks, Michael Pecht**, Cycle life testing and modeling of graphite/LiCoO₂ cells under different state of charge ranges, 2016. Journal of Power Sources, (327), 394-400.
- [21] **E.Sasketa-Zabala, I.Gandiaga, L.M.Rodríguez-Martínez, I.Villarreal**, Calendar ageing analysis of a LiFePO₄/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions, 2014. Journal of Power Sources, (272), 45-57.
- [22] **Rodolfo Dufo-López, Sergio Marquino Leonar, José Luis Bernal Agustín**, Comparison of li-ion battery ageing models applied in photovoltaic stand-alone systems. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
- [23] **Maik Naumann, Michael Schimpe, Peter Keil, Holger C.Hesse, Andreas Jossen**, Analysis and modeling of calendar aging of a commercial LifePO₄/graphite cell, 2018. Journal of Energy Storage, (17), 153-169.
- [24] **Sergio Marquino Leonar, Rodolfo Dufo López**, Comparación de modelos para la estimación de la vida útil de las baterías de ion de litio, 2016. Trabajo final de Grado de la Universidad de Zaragoza.
- [25] **Maik Naumann, Franz B.Spindler, Andreas Jossen**, Analysis and modeling of cycle aging of a commercial LifePO₄/graphite cell, 2020. Journal of Power Sources, (451), 227666.
- [26] **E.Sarasketa-Zabala, I.Gandiaga, E.Martínez-Laserna, L.M.Rodríguez-Martínez, I.Villarreal**, Cycle ageing analysis of a LiFePO₄/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions, 2014. Journal of Power Sources, (275), 573-587.

Anexos

Trabajo Fin de Máster

Título del trabajo : “Evaluación de distintos modelos de vida de baterías de ión litio en sistemas eléctricos aislados y conectados a la red”

Autor/es

Carlos Jesús Godoy Aguilar

Director/es

Rodolfo Dufo López / Raúl Igual Catalán

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2021

Índice de anexos

1.	Anexo I: Modelo A.....	I
1.1	Caso A.....	II
1.2	Caso B.....	IV
2.	Anexo II: Modelo B.....	V
2.1	Caso A y B.....	V
3.	Anexo III: Modelo C.....	VI
3.1	Caso A y B.....	VI
4.	Anexo IV: Modelo F.....	VII
4.1	Caso A y B.....	VII
5.	Anexo V: Modelo G.....	VIII
5.1	Caso A y B.....	VIII
6.	Anexo VI: Combinaciones.....	IX
6.1	Caso A y B.....	IX
7.	Anexo VII: Comparación mediante el método de ciclo equivalente.....	X
8.	Anexo VIII: Resultados.....	XI
8.1	Resultados Modelo A.....	XI
8.1.1	Caso A.....	XI
8.1.2	Caso B.....	XII
8.1.3	Comparación Caso A y Caso B.....	XIV
8.2	Resultados Modelo B.....	XIV
8.2.1	Caso A.....	XIV
8.2.2	Caso B.....	XIV
8.3	Resultados Modelo C.....	XV
8.3.1	Caso A.....	XV
8.3.2	Caso B.....	XVI
8.3.3	Comparación Caso A y Caso B.....	XVII
8.4	Resultados Modelo F.....	XIX
8.4.1	Caso A.....	XIX
8.4.2	Caso B.....	XXI
8.4.3	Comparación Caso A y Caso B.....	XXIII
8.5	Resultados Modelo G.....	XXIV
8.5.1	Caso A.....	XXIV
8.5.2	Caso B.....	XXVI
8.5.3	Comparación Caso A y Caso B.....	XXIX
8.6	Resultados Combinación modelos A y F.....	XXX
8.6.1	Caso A.....	XXXI
8.6.2	Caso B.....	XXXII
8.7	Resultados Combinación modelos A y G.....	XXXII
8.7.1	Caso A.....	XXXII
8.7.2	Caso B.....	XXXIII
8.7.3	Comparación Caso A y Caso B.....	XXXV
8.8	Resultados Combinación modelos B y F.....	XXXVI
8.8.1	Caso A.....	XXXVI
8.8.2	Caso B.....	XXXVII
8.9	Resultados Combinación modelos B y G.....	XXXVIII
8.9.1	Caso A.....	XXXVIII
8.9.2	Caso B.....	XXXIX

8.10	Resultados Combinación modelos C y F	XL
8.10.1	Caso A.....	XL
8.10.2	Caso B.....	XLI
8.10.3	Comparación Caso A y Caso B	XLIII
8.11	Resultados Combinación modelos C y G	XLIV
8.11.1	Caso A.....	XLIV
8.11.2	Caso B.....	XLV
8.11.3	Comparación Caso A y Caso B	XLVI
8.12	Comparación modelo A con modelo de Fabricante	XLVII
8.12.1	Caso A.....	XLVII
8.12.2	Caso B.....	XLVII
8.13	Comparación modelo B con modelo de Fabricante	XLVII
8.13.1	Caso A.....	XLVII
8.13.2	Caso B.....	XLVII
8.14	Comparación modelo C con modelo de Fabricante	XLVIII
8.14.1	Caso A.....	XLVIII
8.14.2	Caso B.....	XLVIII
8.15	Comparación modelo F con modelo de Fabricante.....	XLVIII
8.15.1	Caso A.....	XLVIII
8.15.2	Caso B.....	XLVIII
8.16	Comparación modelo G con modelo de Fabricante	XLVIII
8.16.1	Caso A.....	XLVIII
8.16.2	Caso B.....	XLVIII

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros del modelo A.....	I
Tabla 2: Perfil de consumo de un día.....	II
Tabla 3: C_rates en función de la Tasa C.....	III
Tabla 4: Parámetros del modelo B.....	V
Tabla 5: Parámetros del modelo C.....	VI
Tabla 6: Fórmulas según el perfil.....	VI
Tabla 7: Parámetros del modelo F.....	VII
Tabla 8: Parámetros del modelo G.....	VIII
Tabla 9: Parámetros combinaciones.....	IX
Tabla 10: Parámetros ciclo equivalente.....	X
Tabla 11: Resultados Modelo A. Caso A.....	XI
Tabla 12: Resultados Modelo A Caso B.....	XII
Tabla 13: Resultados Modelo B. Caso A.....	XIV
Tabla 14: Resultados Modelo B. Caso B.....	XIV
Tabla 15: Resultados Modelo C. Caso A.....	XV
Tabla 16: Resultados Modelo C. Caso B.....	XVI
Tabla 17: Resultados Modelo F. Caso A.....	XIX
Tabla 18: Resultados Modelo F. Caso B.....	XXI
Tabla 19: Resultados Modelo G. Caso A (año).....	XXIV
Tabla 20: Resultados Modelo G. Caso A (mes).....	XXV
Tabla 21: Resultados Modelo G. Caso B (año).....	XXVI
Tabla 22: Resultados Modelo G. Caso B (mes).....	XXVII
Tabla 23: Resultados Combinación Modelo A y F. Caso A.....	XXXI
Tabla 24: Resultados Combinación Modelo A y F. Caso B.....	XXXII
Tabla 25: Resultados Combinación Modelos A y G. Caso A.....	XXXII
Tabla 26: Resultados Combinación Modelos A y G. Caso B.....	XXXIII
Tabla 27: Resultados Combinación Modelos B y F. Caso A.....	XXXVI
Tabla 28: Resultados Combinación Modelos B y F. Caso B.....	XXXVII
Tabla 29: Resultados Combinación Modelos B y G. Caso A.....	XXXVIII
Tabla 30: Resultados Combinación Modelos B y G. Caso B.....	XXXIX
Tabla 31: Resultados Combinación Modelos C y F. Caso A.....	XL
Tabla 32: Resultados Combinación Modelos C y F. Caso B.....	XLI
Tabla 33: Resultados Combinación Modelos C y G. Caso A.....	XLIV
Tabla 34: Resultados Combinación Modelos C y G. Caso B.....	XLV
Tabla 35: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo A. Caso A.....	XLVII
Tabla 36: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo A. Caso B.....	XLVII
Tabla 37: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo B. Caso A.....	XLVII
Tabla 38: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo B. Caso B.....	XLVII
Tabla 39: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo C. Caso A.....	XLVIII
Tabla 40: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo C. Caso B.....	XLVIII
Tabla 41: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo F. Caso A.....	XLVIII
Tabla 42: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo F. Caso B.....	XLVIII
Tabla 43: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo G. Caso A.....	XLVIII
Tabla 44: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo G. Caso B.....	XLVIII

Índice de figuras

Figura 1: % Qloss Vs Ciclos. Modelo A. Caso A.	XII
Figura 2: % Vida Cell Vs años. Modelo A. Caso A.	XII
Figura 3: % Qloss Vs Ciclos. Modelo A. Caso B.	XIII
Figura 4: % Vida Cell Vs Años. Modelo A. Caso B.	XIII
Figura 5: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo A. Caso A vs Caso B.	XIV
Figura 6: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo A. Caso A vs Caso B.	XIV
Figura 7: % Qloss Vs Ciclos. Modelo C. Caso A.	XV
Figura 8: % Vida Cell Vs Años. Modelo C. Caso A.	XVI
Figura 9: % Qloss Vs Ciclos. Modelo C. Caso B.	XVI
Figura 10: % Vida Cell Vs Años. Modelo C. Caso B.	XVII
Figura 11: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo C. Caso A vs Caso B.	XVII
Figura 12: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo C. Caso A vs Caso B.	XVIII
Figura 13: % Qloss Vs Ciclos. Modelo F. Caso A.	XX
Figura 14: % Vida Cell Vs Años. Modelo F. Caso A.	XX
Figura 15: % Qloss Vs Ciclos. Modelo F. Caso B.	XXII
Figura 16: % Vida Cell Vs Años. Modelo F. Caso B.	XXII
Figura 17: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo F. Caso A vs Caso B.	XXIII
Figura 18: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo F. Caso A vs Caso B.	XXIII
Figura 19: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A (Año).	XXIV
Figura 20: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A (Año).	XXV
Figura 21: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A (Mes).	XXV
Figura 22: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A (Mes).	XXVI
Figura 23: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso B (Año).	XXVII
Figura 24: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso B (Año).	XXVII
Figura 25: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso B (Mes).	XXVIII
Figura 26: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso B (Mes).	XXVIII
Figura 27: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A vs Caso B (Año).	XXIX
Figura 28: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A vs Caso B (Año).	XXIX
Figura 29: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A vs Caso B (Mes).	XXX
Figura 30: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A vs Caso B (Mes).	XXX
Figura 31: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y F. Caso A.	XXXI
Figura 32: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y F. Caso A.	XXXI
Figura 33: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y G. Caso A.	XXXIII
Figura 34: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y G. Caso A.	XXXIII
Figura 35: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y G. Caso B.	XXXIV
Figura 36: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y G. Caso B.	XXXIV
Figura 37: Comparativa % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y G. Caso A vs Caso B.	XXXV
Figura 38: Comparativa % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y G. Caso A vs Caso B.	XXXV
Figura 39: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo B y F. Caso A.	XXXVII
Figura 40: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo B y F. Caso A.	XXXVII
Figura 41: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo B y G. Caso A.	XXXVIII
Figura 42: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo B y G. Caso A.	XXXIX
Figura 43: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y F. Caso A.	XLI
Figura 44: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y F. Caso A.	XLI
Figura 45: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y F. Caso B.	XLII
Figura 46: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y F. Caso B.	XLII
Figura 47: Comparativa % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y F. Caso A vs Caso B.	XLIII
Figura 48: Comparativa % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y F. Caso A vs Caso B.	XLIII

Figura 49: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y G. Caso A.	XLIV
Figura 50: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y G. Caso A.	XLV
Figura 51: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y G. Caso B.	XLV
Figura 52: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y G. Caso B.	XLVI
Figura 53: Comparativa % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y G. Caso A vs Caso B.	XLVI
Figura 54: Comparativa % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y G. Caso A vs Caso B.	XLVII

1. Anexo I: Modelo A

Este modelo hace referencia al artículo científico “Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells” (Wang, J. et al,2011) [9].

Como se comentó en la memoria, en este Anexo I desarrollaremos los cálculos necesarios para poder obtener la degradación de la batería a partir del modelo A.

Antes de empezar a desarrollar cada uno de los casos, analizaremos los datos necesarios de partida:

- Batería: El modelo de batería corresponde a los datos mostrados en la [tabla 1](#).

[Tabla 1](#): Parámetros del modelo A [9].

Modelo A	
Parámetros	
Capacidad de 1 celda	2,2 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal de 1 celda	2 V

- Eficiencia del inversor y del cargador : 90 %.
- Consumo: 3,63 kWh.
- Generador diésel/gasolina: Variará en función del caso en el que estemos:
 - Caso A: Tendrá un valor de 1000 W.
 - Caso B: Tendrá un valor de 10000 W, ya que la generación fotovoltaica será 0.
- Potencia fotovoltaica: Del mismo modo que ocurría en el punto anterior, en función del caso variará:
 - Caso A: Tendrá un valor de 2000 Wp.
 - Caso B: Tendrá un valor de 0, ya que la generación fotovoltaica será cero.
- Días de autonomía de la batería: Variará en función del caso:
 - Caso A: Tendrá un valor de 4 días.
 - Caso B: Tendrá un valor de 0,1 días.
- Tensión del bus DC: 48 V.
- Irradiación y Temperatura: Parámetros obtenidos a partir de la web de datos PVGIS [18].

A partir de los datos mostrados, ya se puede empezar a estudiar la degradación de la batería para cada uno de los casos. Recordamos que los casos de estudio son los siguientes:

- Caso A: Sistema aislado de la red eléctrica.
- Caso B: Sistema conectado a la red eléctrica.

1.1 Caso A

El caso A se trata de un sistema aislado de la red eléctrica, donde habrá una generación fotovoltaica, con un grupo de apoyo. Los datos de partida son los siguientes:

- Potencia fotovoltaica: 2000 Wp.
- Generador diésel/gasolina: 1000 W.
- Días de autonomía: 4.

El primer paso consiste en definir el perfil de consumo para un día. Este análisis se hará para un año, por lo tanto, el perfil de consumo será el mismo cada día. En la [tabla 2](#) podremos ver el perfil de consumo de un día.

[Tabla 2](#): Perfil de consumo de un día.

Hora	Consumo diario (3,63 kWh)
0:00	22
1:00	22
2:00	22
3:00	22
4:00	22
5:00	22
6:00	110
7:00	176
8:00	132
9:00	110
10:00	110
11:00	308
12:00	308
13:00	220
14:00	176
15:00	154
16:00	132
17:00	176
18:00	242
19:00	264
20:00	286
21:00	264
22:00	242
23:00	88

El segundo paso consiste en calcular la generación fotovoltaica a partir de la ecuación (1).

$$\frac{\text{Irradiación} * \text{Potencia fotovoltaica} * \text{Performance Ratio}}{1000} \quad (1)$$

Donde:

- Irradiación: Es un dato obtenido obtenidos a partir de la web de datos PVGIS [18].
- Potencia fotovoltaica: Dato mencionado anteriormente.
- Performance Ratio: 0,8.

El tercer paso consiste en conocer una serie de datos que son:

- Cuando actúa el generador diésel/gasolina.
- Cuando se carga y descarga la batería.
- La energía no servida.
- Intensidad de la batería.
- SOC final.
- Intensidad por cada celda, intensidad para cada celda de carga y de descarga.
- C-Rate de carga y de descarga.
- Ciclos completos.

Una vez conocidos estos valores, podemos proceder aplicar la ecuación del modelo que nos permite determinar la pérdida de vida útil de la batería. La ecuación (2) nos permite calcular esta pérdida.

$$Q_{\text{loss}} = B \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times C_{\text{Rate}}}{RT} \right] (A_h^{0.55}) \quad (2)$$

La peculiaridad de esta ecuación es que en función del C_Rate el termino B será uno u otro. En la [tabla 3](#) vemos esta relación.

[Tabla 3](#): C_rates en función de la Tasa C [9].

C-rates	Modelo de vida
C/2	31630
2C	21681
6C	12934
10C	15512

Una vez que tenemos esto en cuenta y con los datos obtenidos previamente, simplemente será aplicar la ecuación en función del C_Rate obtenido y de esta forma conocer la pérdida de vida útil. Los resultados vendrán mostrados y comentados en el Anexo VIII.

1.2 Caso B

El caso B se trata de un sistema conectado a la red eléctrica, donde no habrá generación fotovoltaica. Los datos de partida son los siguientes:

- Generador diésel/gasolina: 10000 W.
- Días de autonomía: 0,1.

El procedimiento de cálculo es el mismo que el anterior, únicamente como ya se ha mencionado, se ven modificados los parámetros, por lo que pasaremos directamente al Anexo VIII, donde se pueden observar los resultados.

2. Anexo II: Modelo B

Este modelo hace referencia al 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) [10].

Como se comentó en la memoria, en este Anexo II desarrollaremos los cálculos necesarios para poder obtener la degradación de la batería a partir del modelo B.

Antes de empezar a desarrollar cada uno de los casos, analizaremos los datos necesarios de partida. En este caso, al igual que ocurrirá con los demás anexos únicamente se modificarán los datos de las baterías, como se muestra en la [tabla 4](#). El resto de los datos iniciales coinciden con los del Anexo I:

[Tabla 4](#): Parámetros del modelo B [10].

Modelo B	
Parámetros	
Capacidad de 1 celda	2,3 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal 1 de celda	3,3 V

2.1 Caso A y B

Las condiciones, son las mismas que en epígrafe 1.1 y el 1.2. Por lo tanto, procederemos a mostrar la aplicación del modelo, ya que el proceso inicial es igual. Los resultados se muestran en el Anexo VII.

Por lo tanto, simplemente quedará aplicar la siguiente ecuación (3).

$$Q_{EOL}[KAh] = \left(a * e^{b*1} * T^{(c*I^2+d*I+e)} \right) + f \quad (3)$$

La peculiaridad de la ecuación (3) es que el resultado viene dado en KAh. Por lo que el resultado hay que pasarlo a años. Para esto simplemente habrá que dividir el resultado por la corriente de descarga y de esta forma obtendremos los años de vida estimados. Los resultados se comentan en el Anexo VIII.

3. Anexo III: Modelo C

Este modelo hace referencia al artículo científico “A control-oriented cycle-life model for hybrid electric vehicle lithium-ion batteries” (Suri, G. et al, 2016) [11].

Como se comentó en la memoria, en este Anexo III desarrollaremos los cálculos necesarios para poder obtener la degradación de la batería a partir de modelo C.

Antes de empezar a desarrollar cada uno de los casos, analizaremos los datos necesarios de partida. En este caso, al igual que ocurrirá con en los demás anexos únicamente se modificarán los datos de las baterías, como se muestra en la [tabla 5](#). El resto de los datos iniciales coinciden con los del Anexo I:

[Tabla 5](#): Parámetros del modelo C [11].

Modelo C	
Parámetros	
Capacidad de 1 celda	2,5 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal de 1 celda	3,3 V

3.1 Caso A y B

Las condiciones son las mismas que el epígrafe 1.1 y el 1.2. Por lo tanto, procederemos a mostrar la aplicación del modelo, ya que el proceso inicial es igual. Los resultados se muestran mostrados en el Anexo VIII.

Por lo tanto, simplemente quedaría aplicar las ecuaciones ya vistas y explicada en la memoria. En la [tabla 6](#) se muestran las fórmulas a usar.

[Tabla 6](#): Fórmulas según el perfil [11].

Datos	Modelo
Perfil A	$Q_{\text{loss}} = 0,0480 * Ah^{0,57}$
Perfil B	$Q_{\text{loss}} = 0,0530 * Ah^{0,57}$
Perfil C	$Q_{\text{loss}} = 0,0747 * Ah^{0,57}$

4. Anexo IV: Modelo F

Este modelo hace referencia al artículo científico “Development of an empirical aging model for li-ion batteries and application to assess the impact of vehicle-to-grid strategies on battery lifetime” (Petit, M. et al, 2016) [13].

Como se comentó en la memoria, en este Anexo IV desarrollaremos los cálculos necesarios para poder obtener la degradación de la batería a partir del modelo F.

Antes de empezar a desarrollar cada uno de los casos, analizaremos los datos necesarios de partida. En este caso, al igual que ocurrirá con en los demás anexos únicamente se modificarán los datos de las baterías, como se muestra en la [tabla 7](#). El resto de los datos iniciales coinciden con los del Anexo I:

[Tabla 7](#): Parámetros del modelo F [13].

Modelo F	
Parámetros	
Capacidad de 1 celda	2,2 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal de 1 celda	2 V

4.1 Caso A y B

Las condiciones, son las mismas que en el epígrafe 1.1 y el 1.2. Por lo tanto, procederemos a mostrar la aplicación del modelo, ya que el proceso inicial es igual. Los resultados se mostrarán en el Anexo VIII.

La peculiaridad de este modelo, es que se aplicará una ecuación para calcular el desvanecimiento de capacidad por calendario o por ciclo. La siguiente expresión, hace referencia a que cuando la batería está en carga y la corriente es superior, aplicaremos un modelo para calcular la pérdida de capacidad por ciclo. En caso contrario, aplicaremos el modelo por calendario.

$$\frac{dQ_{\text{loss}}}{dt} = \begin{cases} \frac{dQ_{\text{loss}}^{\text{cal}}}{dt} \rightarrow \bar{I} < I_{\text{cyc}} \\ \frac{dQ_{\text{loss}}^{\text{cyc}}}{dt} \rightarrow \bar{I} > I_{\text{cyc}} \end{cases}$$

Aplicaremos la ecuación de pérdida de capacidad por calendario (4) o por ciclo (5)

$$Q_{\text{loss}}^{\text{cal}} = B_{\text{cal}} (\text{SOC}) \exp\left(-\frac{E_{\text{a cal}}}{RT}\right) t^{\text{Zcal}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{loss}}^{\text{cyc}} = B_{\text{cyc}} \exp\left(-\frac{E_{\text{a cyc}} + \alpha|I|}{RT}\right) \text{Ah}^{\text{Zcyc}} \quad (5)$$

5. Anexo V: Modelo G

Este modelo hace referencia al artículo científico "Lifetime estimation of the nanophosphate LiFePO₄/C battery chemistry used in fully electric vehicles" (Swierczynski, M. et al,2015) [15].

Como se comentó en la memoria, en este Anexo V desarrollaremos los cálculos necesarios para poder obtener la degradación de la batería a partir del modelo G.

Antes de empezar a desarrollar cada uno de los casos, analizaremos los datos necesarios de partida. En este caso, al igual que ocurrirá con en los demás anexos únicamente se modificarán los datos de las baterías, como se muestra en la [tabla 8](#). El resto de los datos iniciales coinciden con los del Anexo I:

[Tabla 8](#): Parámetros del modelo G [15].

Modelo G	
Parámetros	
Capacidad de 1 celda	2,5 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal de 1 celda	3,3 V

5.1 Caso A y B

Las condiciones son las mismas que en el epígrafe 1.1 y el 1.2. Por lo tanto, procederemos a mostrar la aplicación del modelo, ya que el proceso inicial es igual. Los resultados se muestran en el Anexo VIII.

Por lo tanto, simplemente quedará aplicar la siguiente ecuación (6).

$$C_{FADE}(t,T,SOC_{st})=(0,019*SOC_{st}^{0,823}+0,5195)*(3,258*10^{-9}*T^{5,087}+0,295)*t^{0,8} \quad (6)$$

6. Anexo VI: Combinaciones

En este apartado, lo que hemos hecho ha sido combinar los diferentes modelos de calendario y ciclo entre sí. Para ver cómo sería la degradación de la vida útil de la batería en estas condiciones.

Para saber cuándo utilizar un modelo por calendario o por ciclado, se ha puesto la siguiente condición: cuando el C-Rate es mayor que 0,05 utilizaremos el modelo por ciclado y cuando sea menor utilizaremos el modelo por calendario.

Las combinaciones que haremos serán las siguientes:

- Wang, J.et al (modelo A) [9] y Petit, M.et al (modelo F) [13]: En este modelo no se seguirá la relación comentada en este apartado, sino que seguiremos la relación mencionada en el apartado 4.2.2, para replicar el modelo exacto.
- Wang, J.et al (modelo A) [9] y Swierczynski, M.et al (modelo G) [15].
- Groot, J.et al (modelo B) [10] y Petit, M.et al (modelo F) [13].
- Groot, J.et al (modelo B) [10] y Swierczynski, M.et al (modelo G) [15].
- Suri, G.et al (modelo C) [11] y Petit, M.et al (modelo F) [13].
- Suri, G.et al (modelo C) [11] y Swierczynski, M.et al (modelo G) [15].

Los datos de la batería que vamos a usar para todos los casos serán los mismos. Los podemos encontrar en la [tabla 9](#). El resto de los datos iniciales coinciden con los del Anexo I.

Tabla 9: Parámetros combinaciones.

Combinaciones	
Parámetros	
Capacidad de 1 celda	2,2 Ah
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono
Tensión nominal de 1 celda	2 V

6.1 Caso A y B

Las condiciones son las mismas que en el epígrafe 1.1 y el 1.2. Por lo tanto, procederemos a mostrar la aplicación del modelo, ya que el proceso inicial es igual. Los resultados se muestran en el Anexo VIII.

Por lo tanto, simplemente quedará aplicar las ecuaciones correspondientes a cada modelo ya mostradas, cumpliendo la regla establecida, para ver en cada caso qué se utilizará: si modelo por ciclo o por calendario.

7. Anexo VII: Comparación mediante el método de ciclo equivalente

En los modelos basados en ciclos equivalentes se cuenta la carga ciclada de la batería desde el inicio de su vida útil, sin tener en cuenta el SOC, la temperatura, la corriente o cualquier otra variable. El modelo de recuento de ciclos rainflow incluye el efecto de la profundidad de descarga. Sin embargo, las condiciones reales de funcionamiento son diferentes de las condiciones de laboratorio, mostradas en la hoja de datos del fabricante, por lo que se podrá apreciar un error significativo en la predicción de la vida útil [4,14].

El objetivo de este apartado es comparar el número de años que tarda en llegar al fin de su vida útil una batería, a partir de los datos proporcionados por el fabricante con los datos obtenidos en los diferentes modelos planteados en este trabajo. Los resultados se incluyen en el Anexo VIII.

Para poder obtener los resultados habrá que aplicar la expresión (7). Con ella se calcularán los años que la batería tardará en llegar al fin de su vida útil, según los datos de los fabricantes.

$$\text{Años} = \frac{\text{Ciclos según fabricante}}{\text{Ciclos en un año (estimados por el modelo)}} \quad (7)$$

A continuación, la [tabla 10](#) muestra los parámetros necesarios aportados por el fabricante, para poder realizar dicha comparación.

[Tabla 10](#): Parámetros ciclo equivalente [19].

Ciclo equivalente	
Parámetros	
Ciclo de vida (DOD %100)	≥2500 ciclos
Cátodo	LiFePO ₄
Ánodo	Carbono

Para ver esta diferencia con mayor precisión, en el Anexo VIII como ya se ha mencionado, se compararán los datos del fabricante con cada uno de los modelos de estudio y para ambos casos.

8. Anexo VIII: Resultados

El objetivo de este apartado es mostrar los resultados para cada uno de los casos ya explicados en la memoria, tanto de los modelos como de las combinaciones ya explicadas.

Los resultados se han obtenido con el programa de cálculo Excel, donde se han ido programados los diferentes modelos.

Los resultados se van a mostrar de la siguiente manera: por un lado, para los casos A y B se podrá observar una gráfica y una tabla, donde se podrá apreciar la degradación de la batería hasta llegar al fin de su vida útil; por otro lado, para la comparación de los casos A y B, se podrá observar una gráfica y una tabla donde veremos una comparativa de ambos casos con el fin de comparar cómo es la degradación de ambas y cuál llega antes al fin de su vida útil. Este proceso se repetirá para las combinaciones. Por último, en los apartados donde se constata con los datos proporcionados por el fabricante, se comparan el número de ciclos estimados por los fabricantes con el número de ciclos obtenidos por los modelos.

8.1 Resultados Modelo A

8.1.1 Caso A

Tabla 11: Resultados Modelo A. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,21	0,43	0,43	99,57
2	88,43	0,63	1,07	98,93
3	132,64	0,79	1,86	98,14
4	176,86	0,93	2,79	97,21
5	221,07	1,05	3,84	96,16
6	265,28	1,16	5,00	95,00
7	309,50	1,26	6,27	93,73
8	353,71	1,36	7,63	92,37
9	397,93	1,45	9,08	90,92
10	442,14	1,54	10,62	89,38
11	486,35	1,62	12,24	87,76
12	530,57	1,70	13,94	86,06
13	574,78	1,78	15,71	84,29
14	619,00	1,85	17,56	82,44
15	663,21	1,92	19,48	80,52
16	707,42	1,99	21,48	78,52

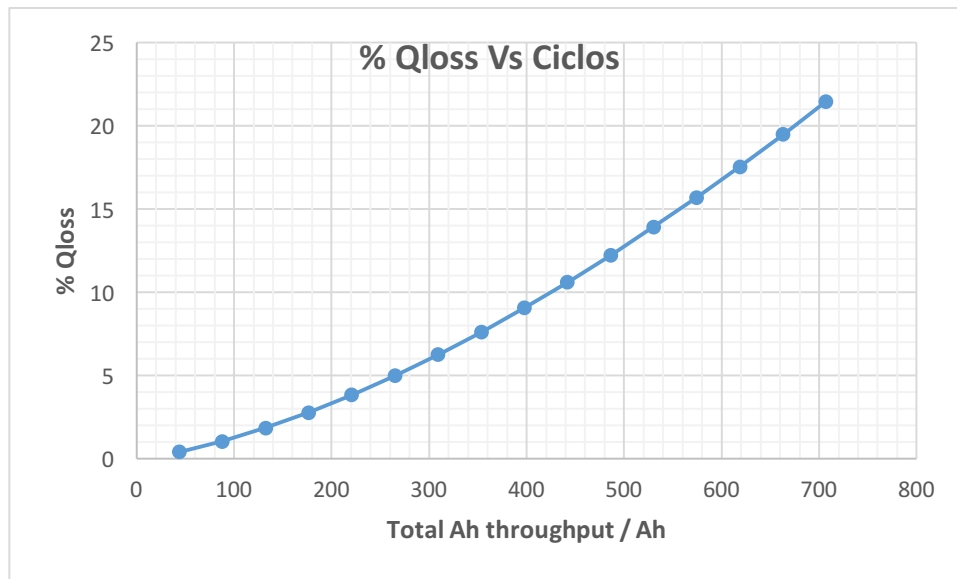


Figura 1: % Qloss Vs Ciclos. Modelo A. Caso A.

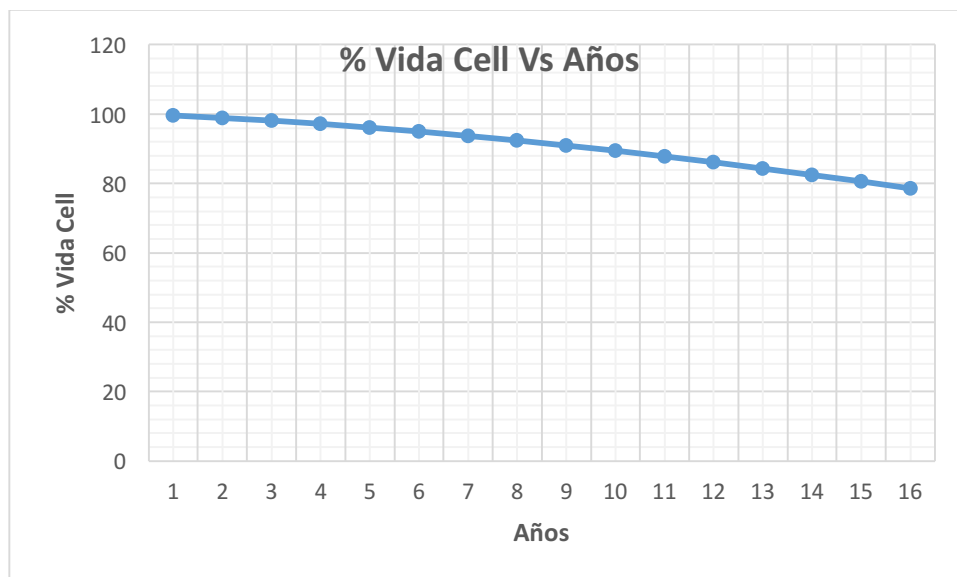


Figura 2: % Vida Cell Vs años. Modelo A. Caso A.

8.1.2 Caso B

Tabla 12: Resultados Modelo A Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2647,38	4,31	4,31	95,69
2	5294,75	6,31	10,62	89,38
3	7942,13	7,89	18,50	81,50
4	10589,51	9,24	27,74	72,26
5	13236,88	10,44	38,19	61,81

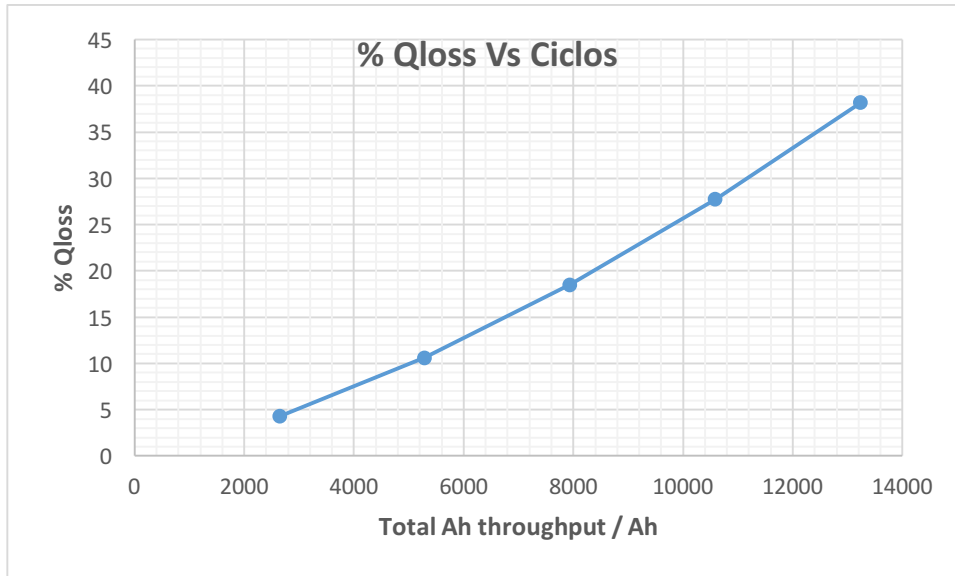


Figura 3: % Qloss Vs Ciclos. Modelo A. Caso B.

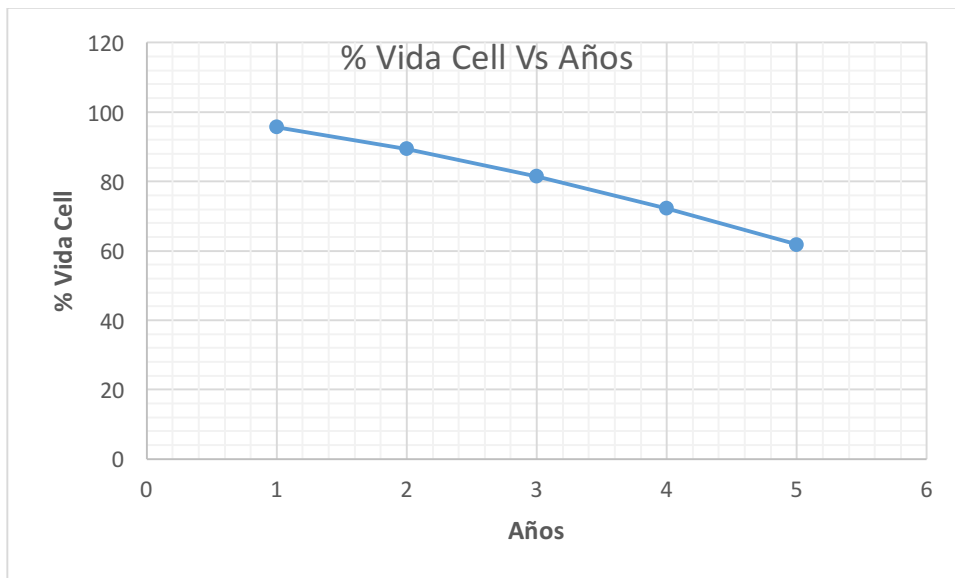


Figura 4: % Vida Cell Vs Años. Modelo A. Caso B.

8.1.3 Comparación Caso A y Caso B

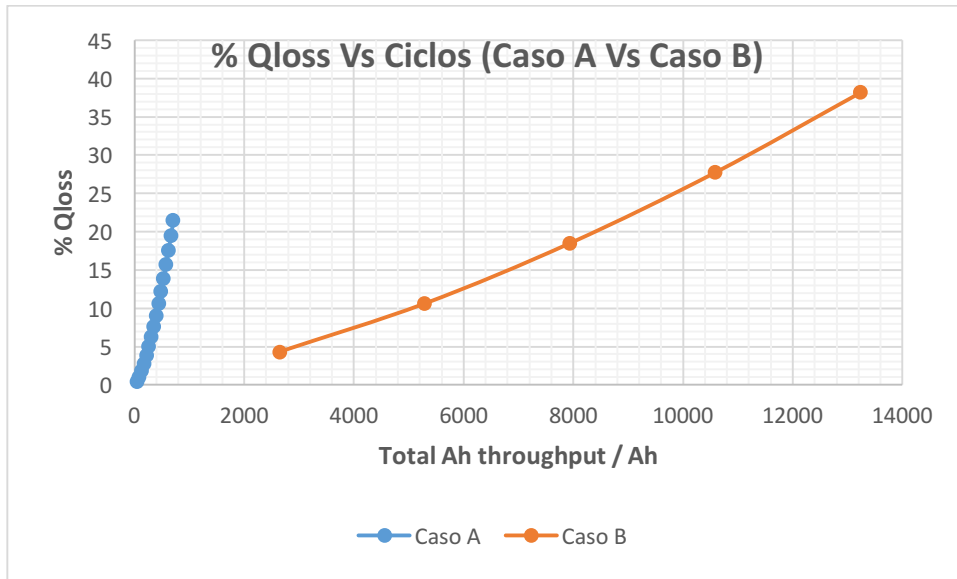


Figura 5: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo A. Caso A vs Caso B.

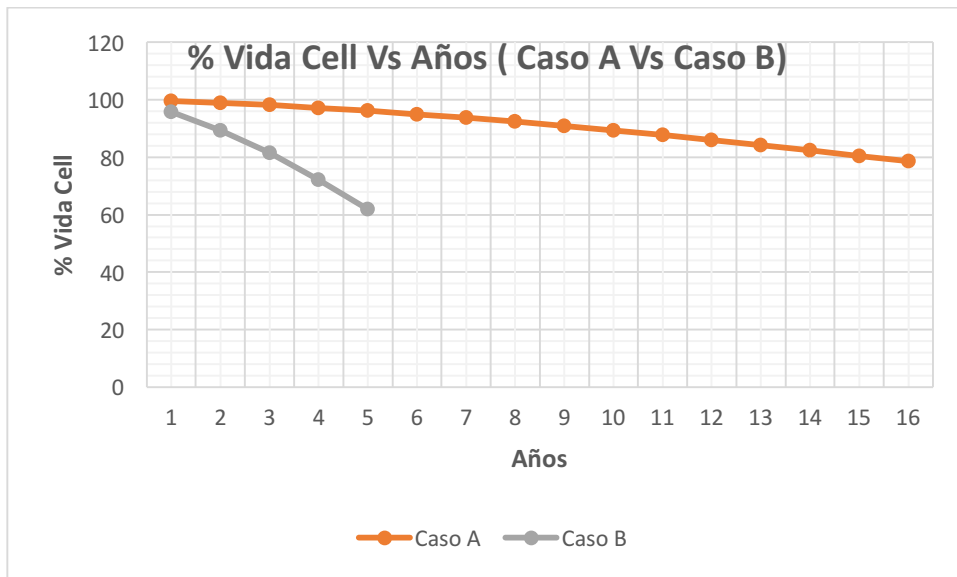


Figura 6: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo A. Caso A vs Caso B.

8.2 Resultados Modelo B

8.2.1 Caso A

Tabla 13: Resultados Modelo B. Caso A.

Año	KAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
1	22,27	221,00

8.2.2 Caso B

Tabla 14: Resultados Modelo B. Caso B.

Año	KAh capaz de ciclar	Años EOL estimados
1	315,75	54,21

8.3 Resultados Modelo C

8.3.1 Caso A

Tabla 15: Resultados Modelo C. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	43,71	0,76	0,76	99,24
2	87,38	1,14	1,90	98,10
3	131,06	1,43	3,33	96,67
4	174,74	1,69	5,02	94,98
5	234,03	1,92	6,94	93,06
6	262,09	2,13	9,06	90,94
7	305,76	2,32	11,38	88,62
8	349,44	2,51	13,89	86,11
9	393,12	2,68	16,57	83,43
10	436,79	2,85	19,41	80,59
11	480,47	3,00	22,42	77,58

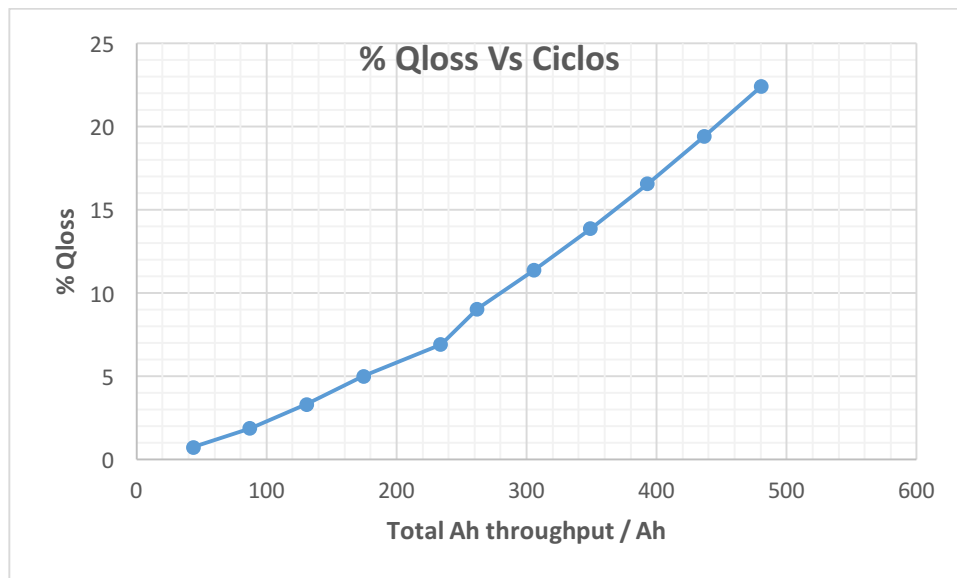


Figura 7: % Qloss Vs Ciclos. Modelo C. Caso A.

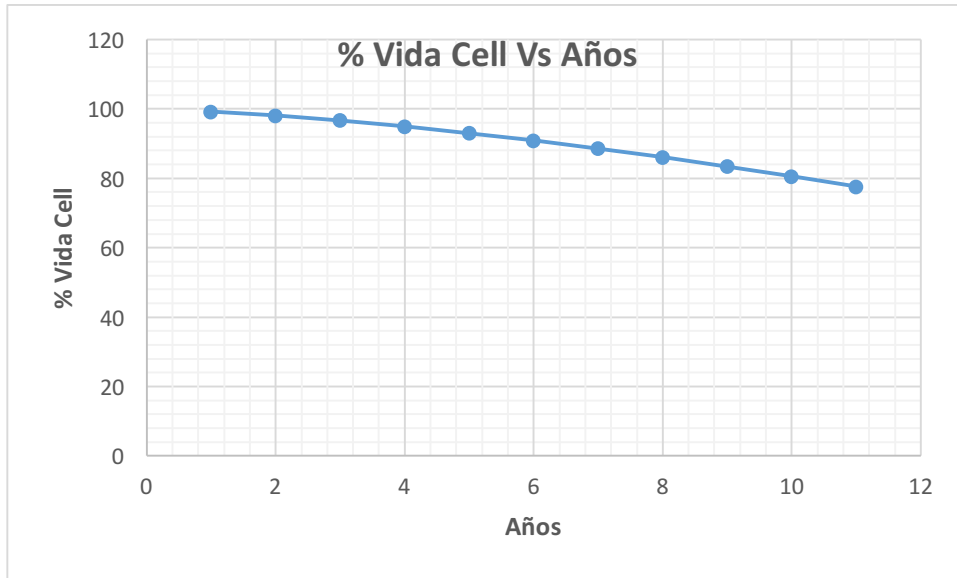


Figura 8: % Vida Cell Vs Años. Modelo C. Caso A.

8.3.2 Caso B

Tabla 16: Resultados Modelo C. Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2329,69	5,85	5,85	94,15
2	4659,38	8,69	14,55	85,45
3	6989,07	10,95	25,50	74,50
4	9318,77	12,90	38,40	61,60
5	12446,30	14,65	53,05	46,95

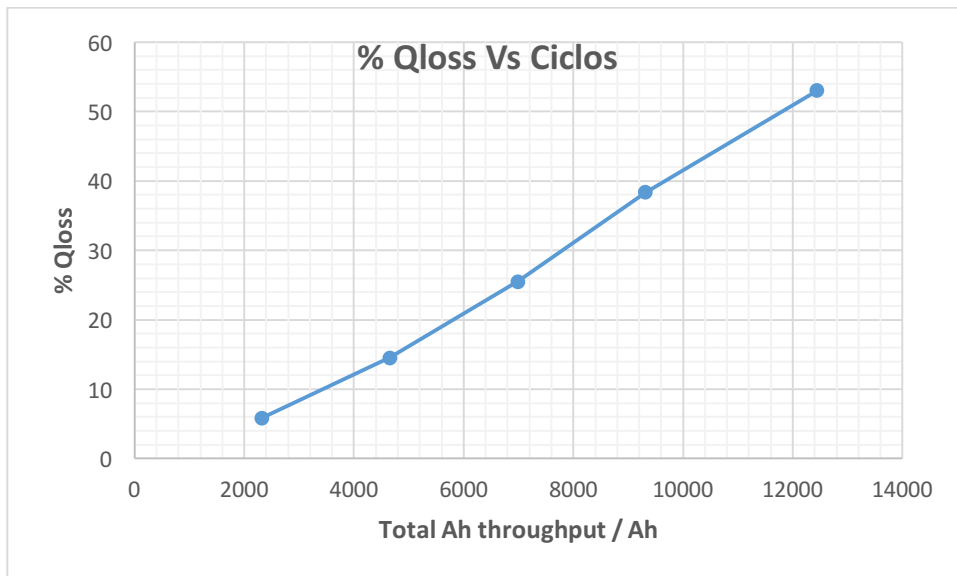


Figura 9: % Qloss Vs Ciclos. Modelo C. Caso B.

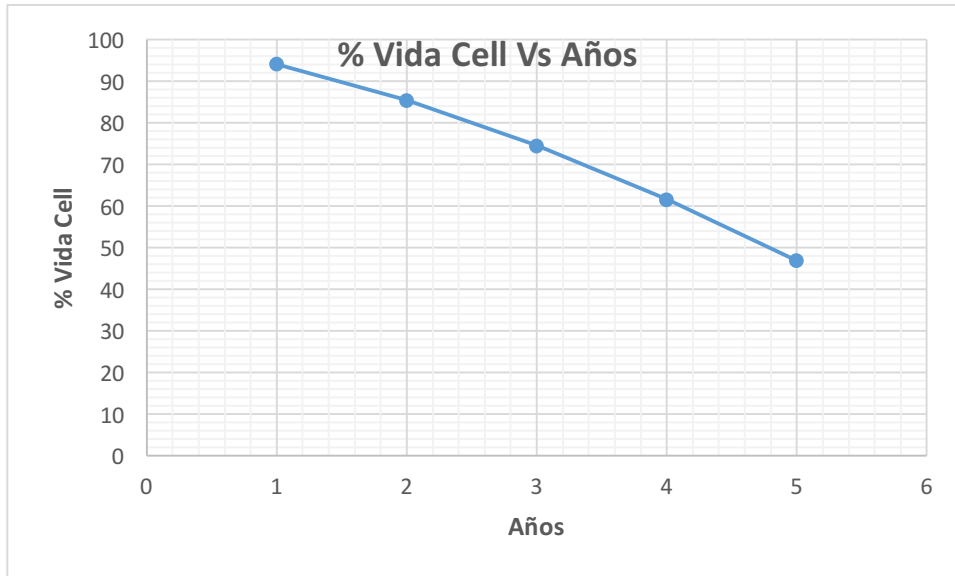


Figura 10: % Vida Cell Vs Años. Modelo C. Caso B.

8.3.3 Comparación Caso A y Caso B

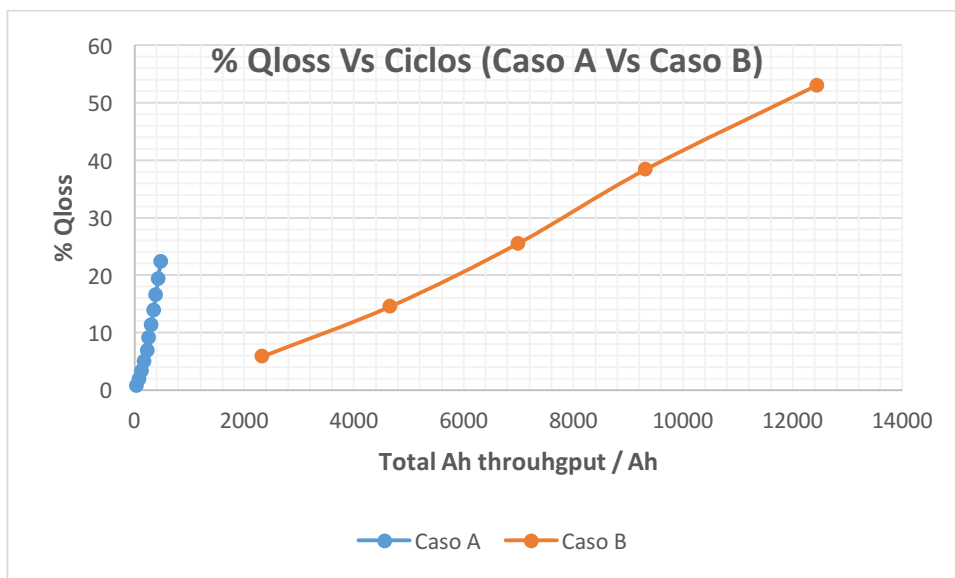


Figura 11: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo C. Caso A vs Caso B.

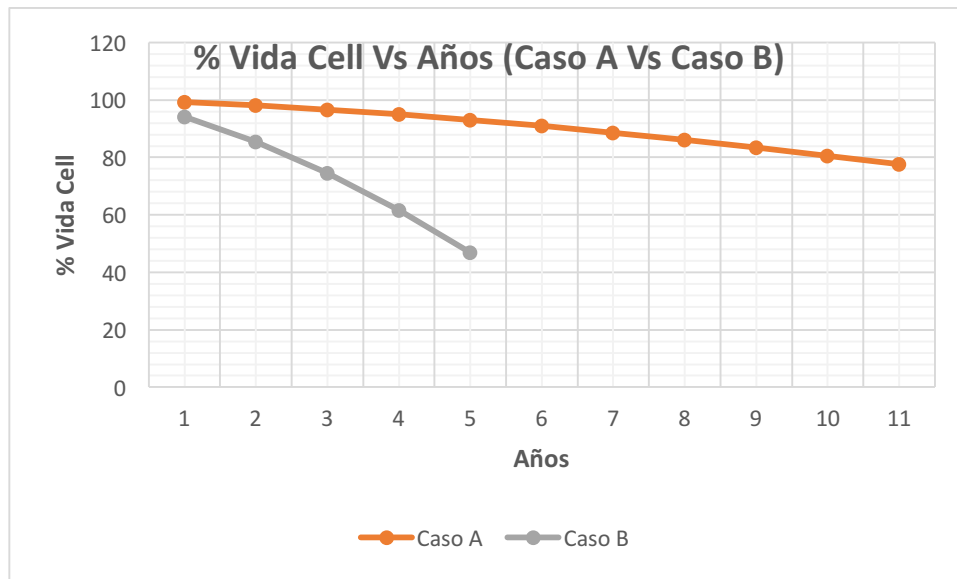


Figura 12: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo C. Caso A vs Caso B.

8.4 Resultados Modelo F

Los resultados que veremos en este apartado únicamente contemplan la parte del modelo de calendario ya que, como se ha mencionado anteriormente, el artículo científico donde se expone el modelo de Petit, M.et al es una combinación entre dicho modelo y el modelo de ciclado de Wang, J.et al [13].

8.4.1 Caso A

Tabla 17: Resultados Modelo F. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,21	0,62	0,62	99,38
2	88,43	0,62	1,23	98,77
3	132,64	0,62	1,85	98,15
4	176,86	0,62	2,46	97,54
5	221,07	0,62	3,08	96,92
6	265,28	0,62	3,69	96,31
7	309,50	0,62	4,31	95,69
8	353,71	0,62	4,92	95,08
9	397,93	0,62	5,54	94,46
10	442,14	0,62	6,15	93,85
11	486,35	0,62	6,77	93,23
12	530,57	0,62	7,38	92,62
13	574,78	0,62	8,00	92,00
14	619,00	0,62	8,61	91,39
15	663,21	0,62	9,23	90,77
16	707,42	0,62	9,84	90,16
17	751,64	0,62	10,46	89,54
18	795,85	0,62	11,08	88,92
19	840,07	0,62	11,69	88,31
20	884,28	0,62	12,31	87,69
21	928,49	0,62	12,92	87,08
22	972,71	0,62	13,54	86,46
23	1016,92	0,62	14,15	85,85
24	1061,14	0,62	14,77	85,23
25	1105,35	0,62	15,38	84,62
26	1149,56	0,62	16,00	84,00
27	1193,78	0,62	16,61	83,39
28	1237,99	0,62	17,23	82,77
29	1282,21	0,62	17,84	82,16
30	1326,42	0,62	18,46	81,54
31	1370,63	0,62	19,07	80,93
32	1414,85	0,62	19,69	80,31
33	1459,06	0,62	20,30	79,70
34	1503,28	0,62	20,92	79,08

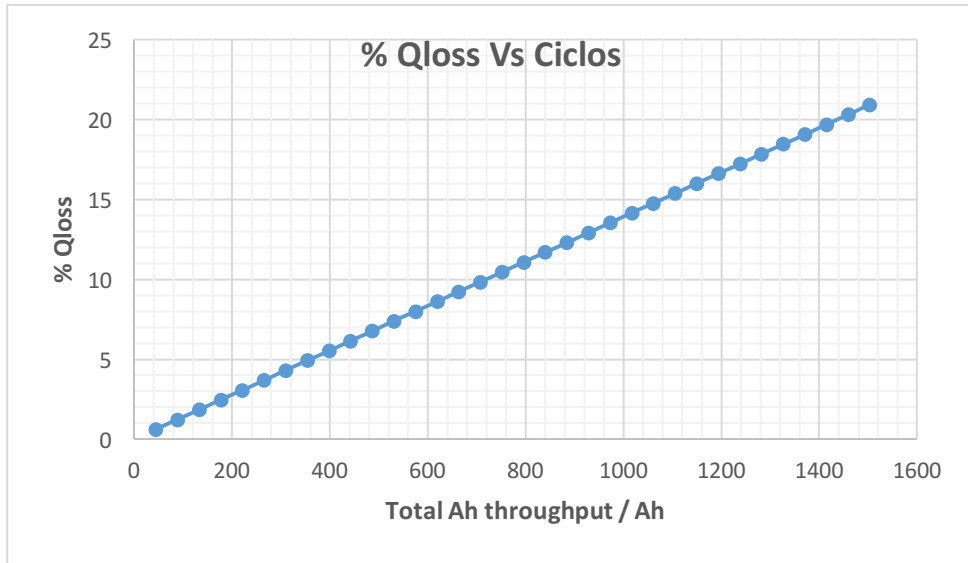


Figura 13: % Qloss Vs Ciclos. Modelo F. Caso A.

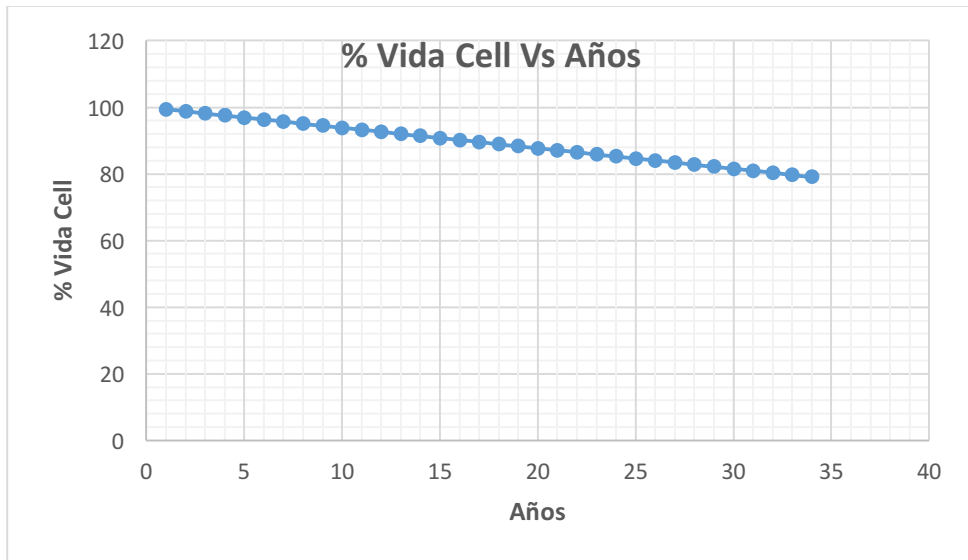


Figura 14: % Vida Cell Vs Años. Modelo F. Caso A.

8.4.2 Caso B

Tabla 18: Resultados Modelo F. Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2647,38	0,46	0,46	99,54
2	5294,75	0,46	0,92	99,08
3	7942,13	0,46	1,38	98,62
4	10589,51	0,46	1,83	98,17
5	13236,88	0,46	2,29	97,71
6	15884,26	0,46	2,75	97,25
7	18531,64	0,46	3,21	96,79
8	21179,01	0,46	3,67	96,33
9	23826,39	0,46	4,13	95,87
10	26473,77	0,46	4,58	95,42
11	29121,14	0,46	5,04	94,96
12	31768,52	0,46	5,50	94,50
13	34415,90	0,46	5,96	94,04
14	37063,27	0,46	6,42	93,58
15	39710,65	0,46	6,88	93,12
16	42358,02	0,46	7,34	92,66
17	45005,40	0,46	7,79	92,21
18	47652,78	0,46	8,25	91,75
19	50300,15	0,46	8,71	91,29
20	52947,53	0,46	9,17	90,83
21	55594,91	0,46	9,63	90,37
22	58242,28	0,46	10,09	89,91
23	60889,66	0,46	10,55	89,45
24	63537,04	0,46	11,00	89,00
25	66184,41	0,46	11,46	88,54
26	68831,79	0,46	11,92	88,08
27	71479,17	0,46	12,38	87,62
28	74126,54	0,46	12,84	87,16
29	76773,92	0,46	13,30	86,70
30	79421,30	0,46	13,75	86,25
31	82068,67	0,46	14,21	85,79
32	84716,05	0,46	14,67	85,33
33	87363,43	0,46	15,13	84,87
34	90010,80	0,46	15,59	84,41
35	92658,18	0,46	16,05	83,95
36	95305,56	0,46	16,51	83,49
37	97952,93	0,46	16,96	83,04
38	100600,31	0,46	17,42	82,58
39	103247,69	0,46	17,88	82,12
40	105895,06	0,46	18,34	81,66
41	108542,44	0,46	18,80	81,20
42	111189,81	0,46	19,26	80,74
43	113837,19	0,46	19,72	80,28
44	116484,57	0,46	20,17	79,83
45	119131,94	0,46	20,63	79,37

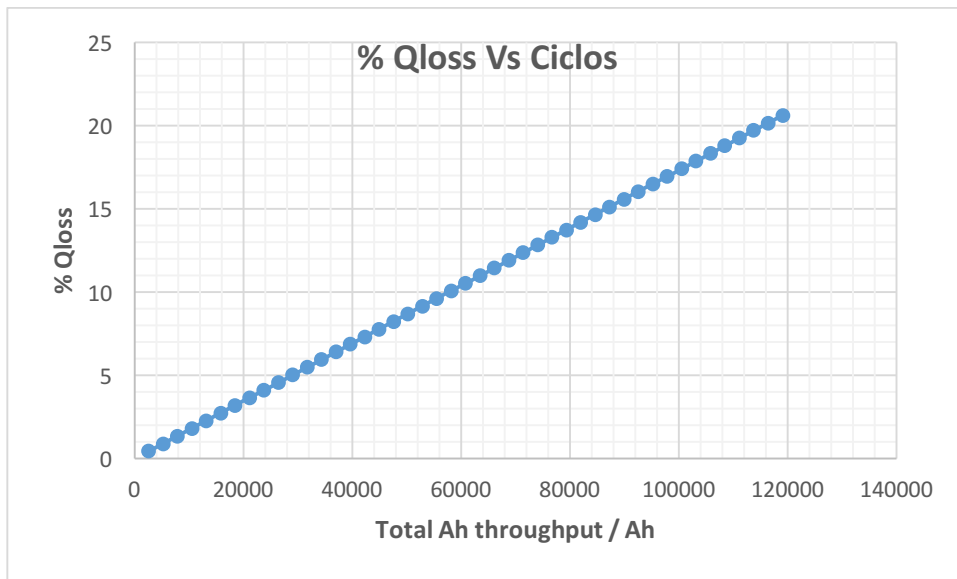


Figura 15: % Qloss Vs Ciclos. Modelo F. Caso B.

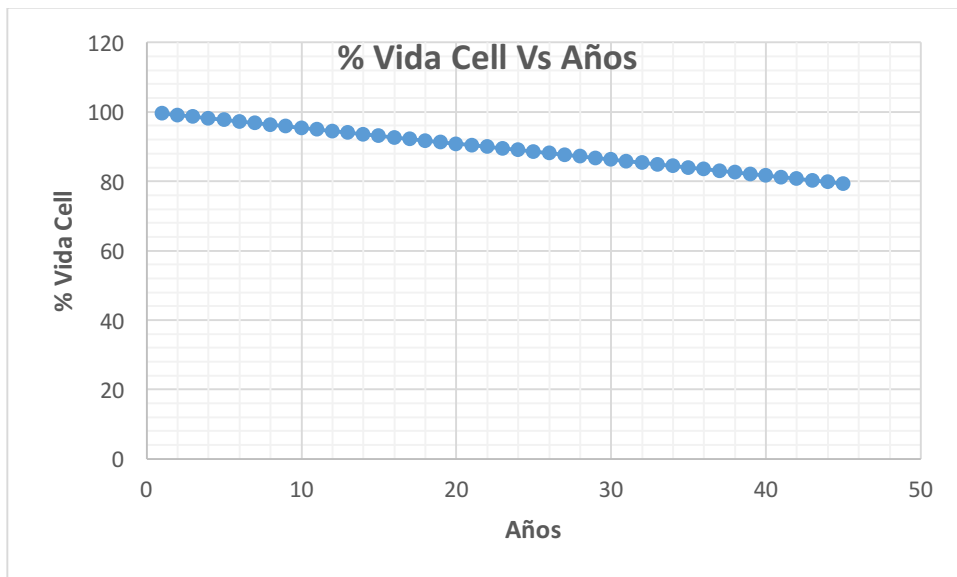


Figura 16: % Vida Cell Vs Años. Modelo F. Caso B.

8.4.3 Comparación Caso A y Caso B

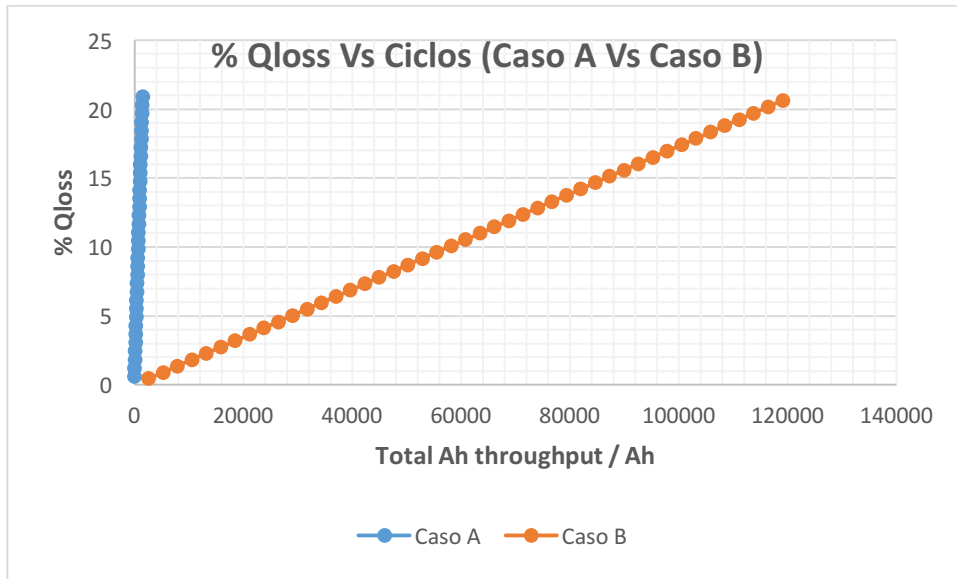


Figura 17: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo F. Caso A vs Caso B.

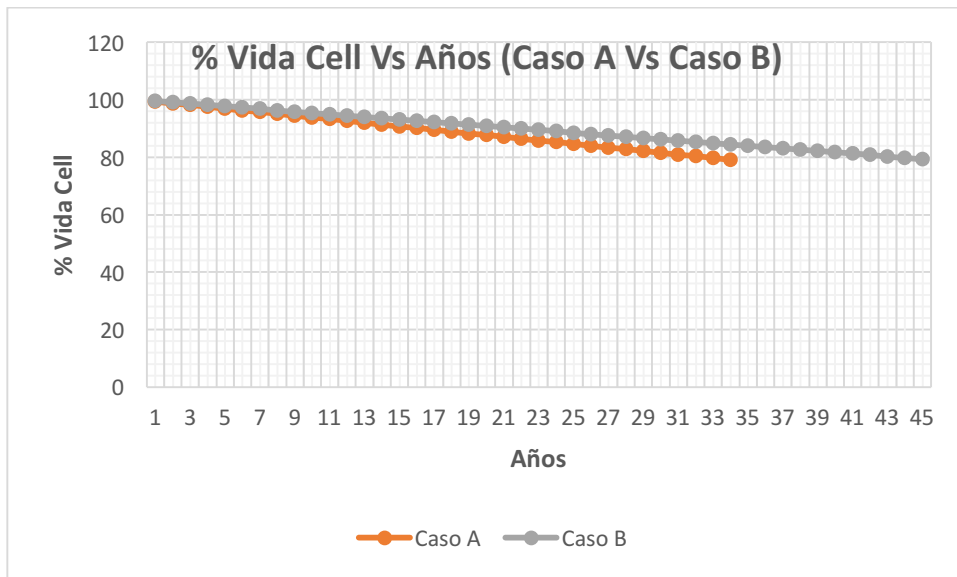


Figura 18: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo F. Caso A vs Caso B.

8.5 Resultados Modelo G

8.5.1 Caso A

Tabla 19: Resultados Modelo G. Caso A (año).

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	43,71	1,16	1,16	98,84
2	87,38	1,16	2,32	97,68
3	131,06	1,16	3,48	96,52
4	174,74	1,16	4,64	95,36
5	218,41	1,16	5,80	94,20
6	262,09	1,16	6,96	93,04
7	305,76	1,16	8,12	91,88
8	349,44	1,16	9,27	90,73
9	393,11	1,16	10,43	89,57
10	436,79	1,16	11,59	88,41
11	480,47	1,16	12,75	87,25
12	524,14	1,16	13,91	86,09
13	567,82	1,16	15,07	84,93
14	611,49	1,16	16,23	83,77
15	655,17	1,16	17,39	82,61
16	698,84	1,16	18,55	81,45
17	742,52	1,16	19,71	80,29
18	786,20	1,16	20,87	79,13
19	829,87	1,16	22,03	77,97

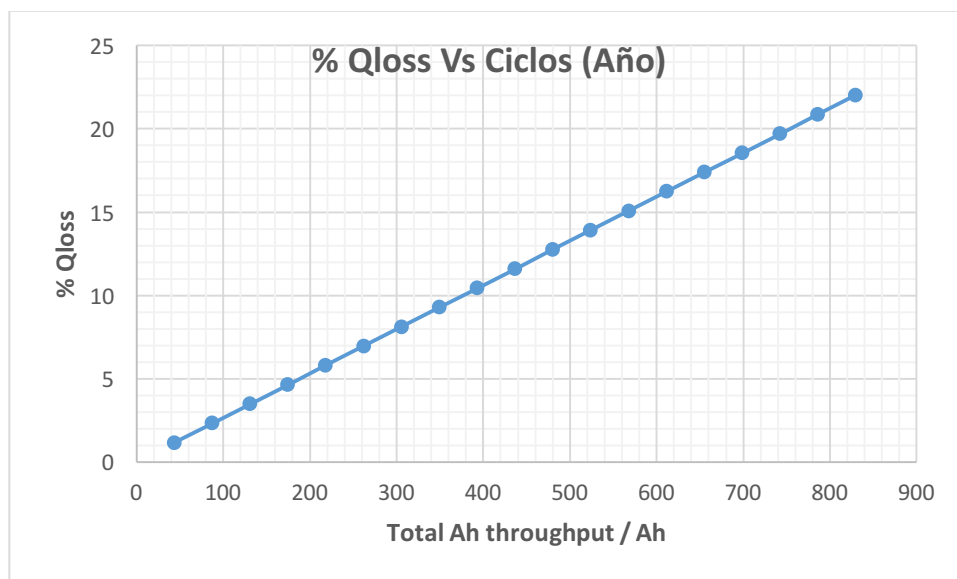


Figura 19: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A (Año).

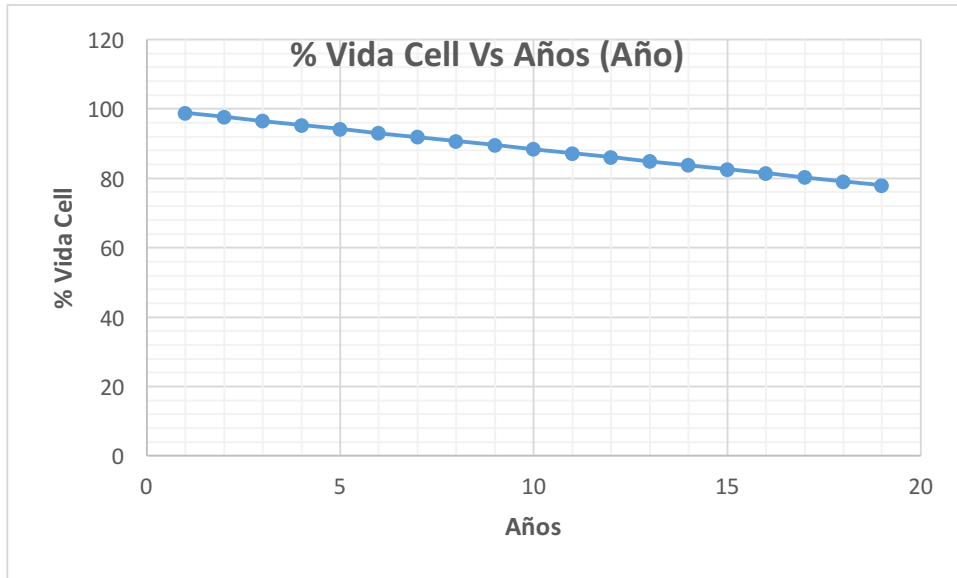


Figura 20: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A (Año).

Tabla 20: Resultados Modelo G. Caso A (mes).

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	43,71	1,96	1,96	98,04
2	87,38	1,96	3,92	96,08
3	131,06	1,96	5,88	94,12
4	174,74	1,96	7,84	92,16
5	218,41	1,96	9,80	90,20
6	262,09	1,96	11,76	88,24
7	305,76	1,96	13,72	86,28
8	349,44	1,96	15,68	84,32
9	393,11	1,96	17,64	82,36
10	436,79	1,96	19,60	80,40
11	480,47	1,96	21,56	78,44
12	524,14	1,96	23,52	76,48

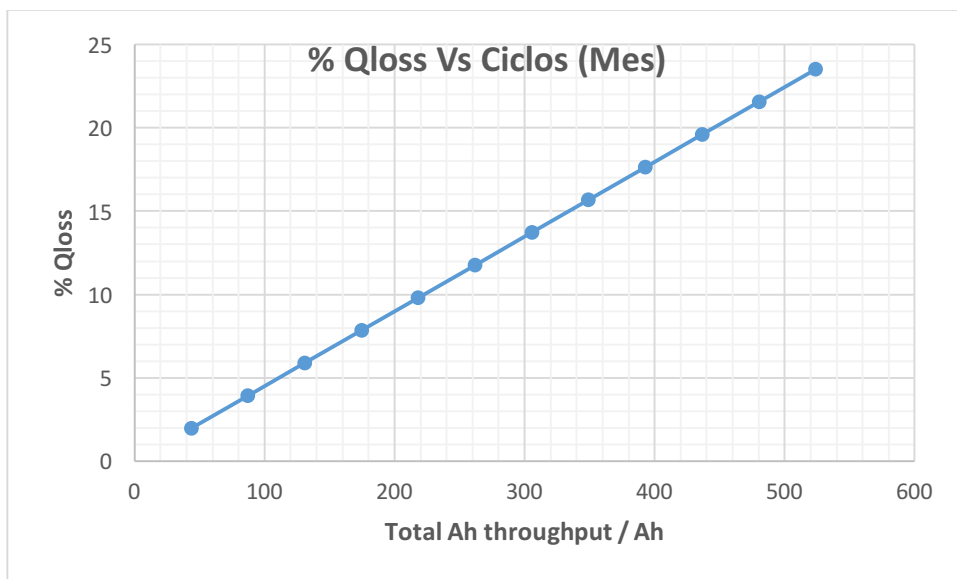


Figura 21: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A (Mes).

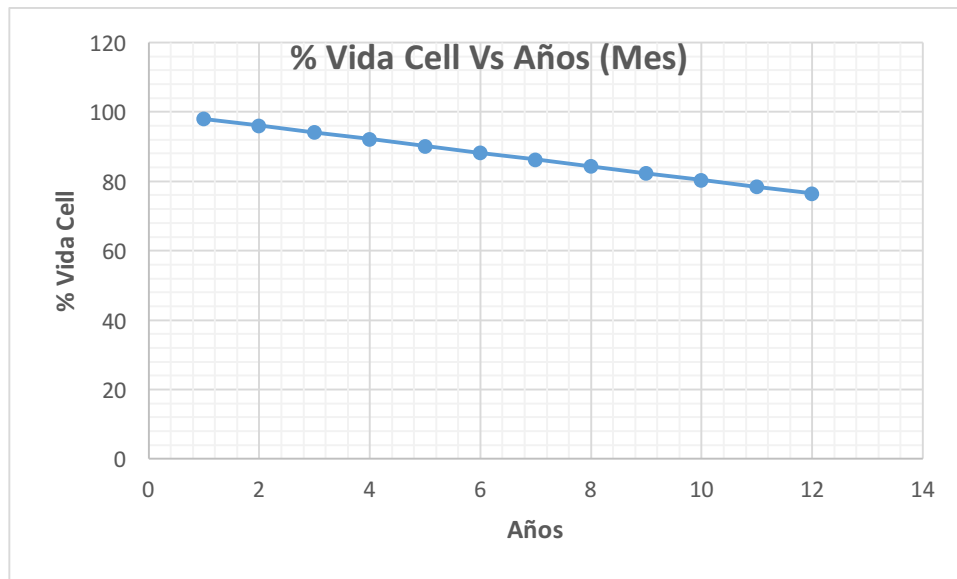


Figura 22: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A (Mes).

8.5.2 Caso B

Tabla 21: Resultados Modelo G. Caso B (año).

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2329,69	1,15	1,15	98,85
2	4659,38	1,15	2,31	97,69
3	6989,07	1,15	3,46	96,54
4	9318,77	1,15	4,61	95,39
5	11648,46	1,15	5,77	94,23
6	13978,15	1,15	6,92	93,08
7	16307,84	1,15	8,07	91,93
8	18637,53	1,15	9,23	90,77
9	20967,22	1,15	10,38	89,62
10	23296,91	1,15	11,53	88,47
11	25626,60	1,15	12,69	87,31
12	27956,30	1,15	13,84	86,16
13	30285,99	1,15	14,99	85,01
14	32615,68	1,15	16,15	83,85
15	34945,37	1,15	17,30	82,70
16	37275,06	1,15	18,45	81,55
17	39604,82	1,15	19,61	80,39
18	41934,51	1,15	20,76	79,24
19	44264,14	1,15	21,91	78,09

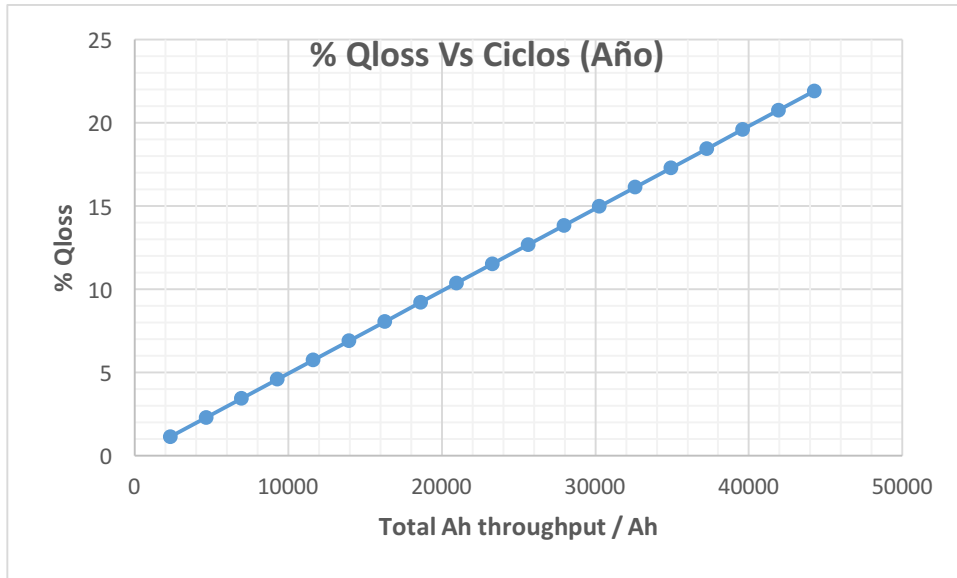


Figura 23: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso B (Año).

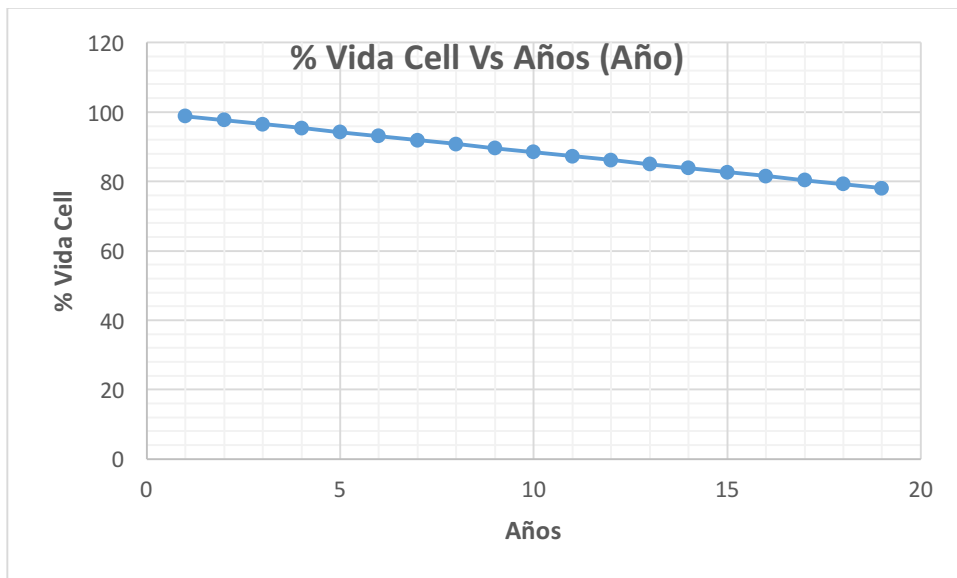


Figura 24: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso B (Año).

Tabla 22: Resultados Modelo G. Caso B (mes).

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2329,69	1,95	1,95	98,05
2	4659,38	1,95	3,90	96,10
3	6989,07	1,95	5,85	94,15
4	9318,77	1,95	7,80	92,20
5	11648,46	1,95	9,75	90,25
6	13978,15	1,95	11,70	88,30
7	16307,84	1,95	13,64	86,36
8	18637,53	1,95	15,59	84,41
9	20967,22	1,95	17,54	82,46
10	23296,91	1,95	19,49	80,51
11	25626,60	1,95	21,44	78,56
12	27956,30	1,95	23,39	76,61

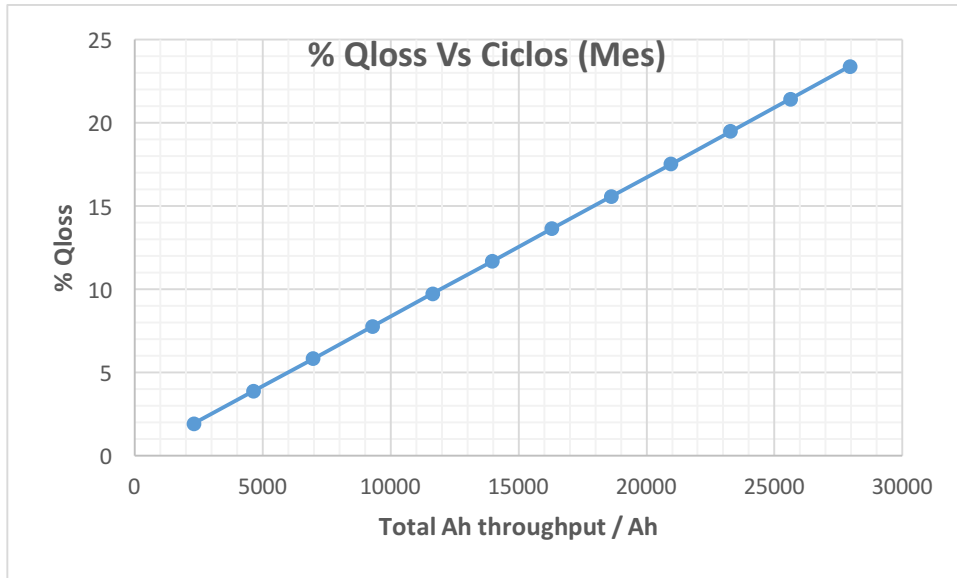


Figura 25: % Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso B (Mes).

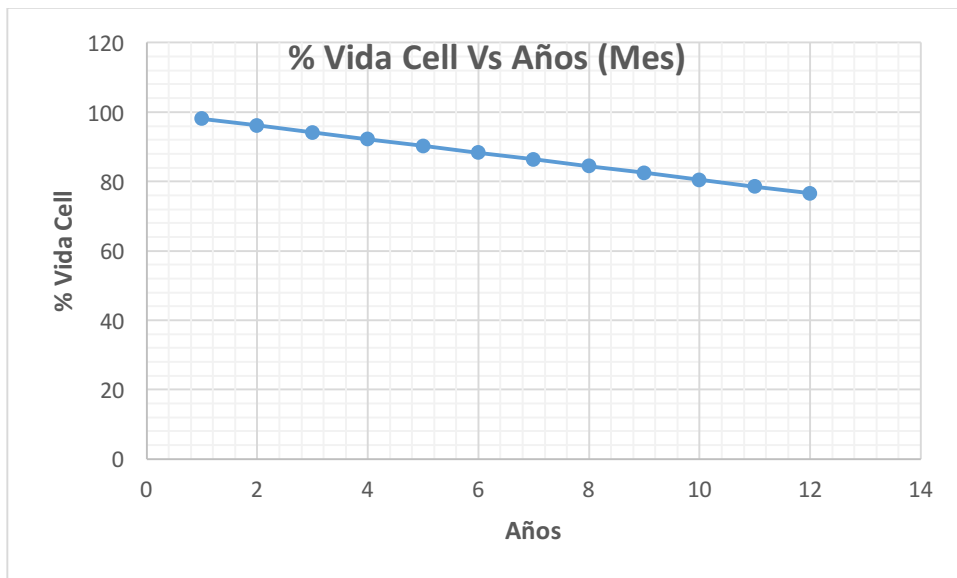


Figura 26: % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso B (Mes).

8.5.3 Comparación Caso A y Caso B

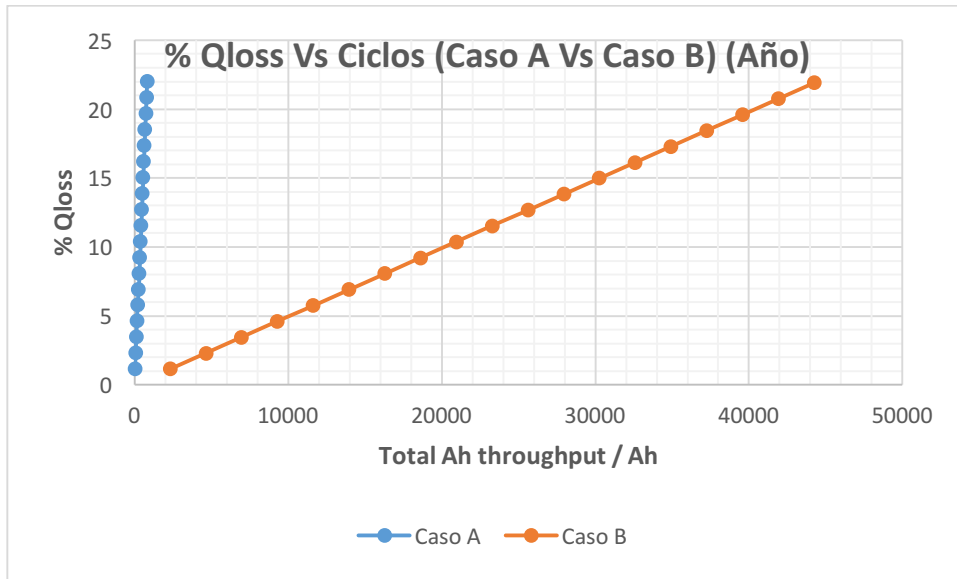


Figura 27: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A vs Caso B (Año).

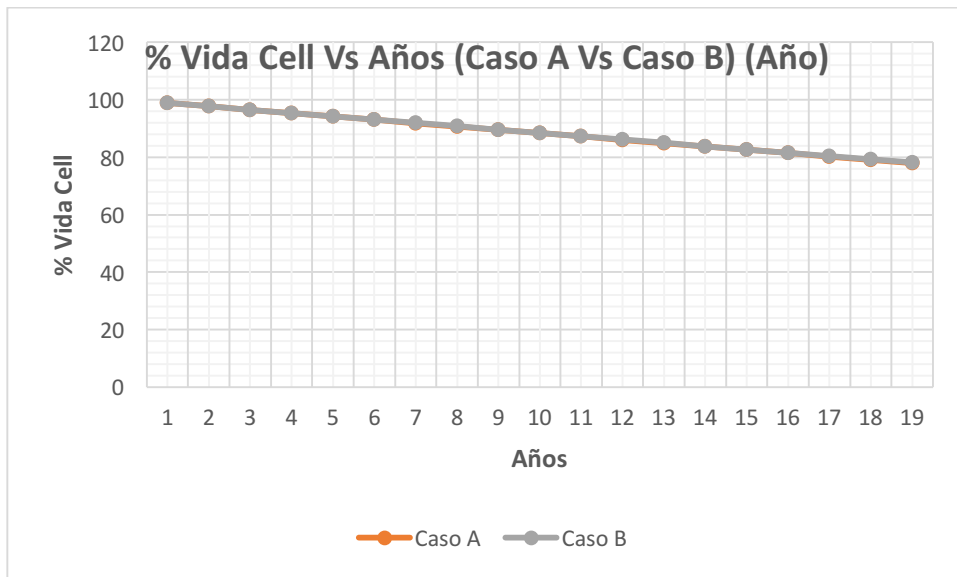


Figura 28: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A vs Caso B (Año).

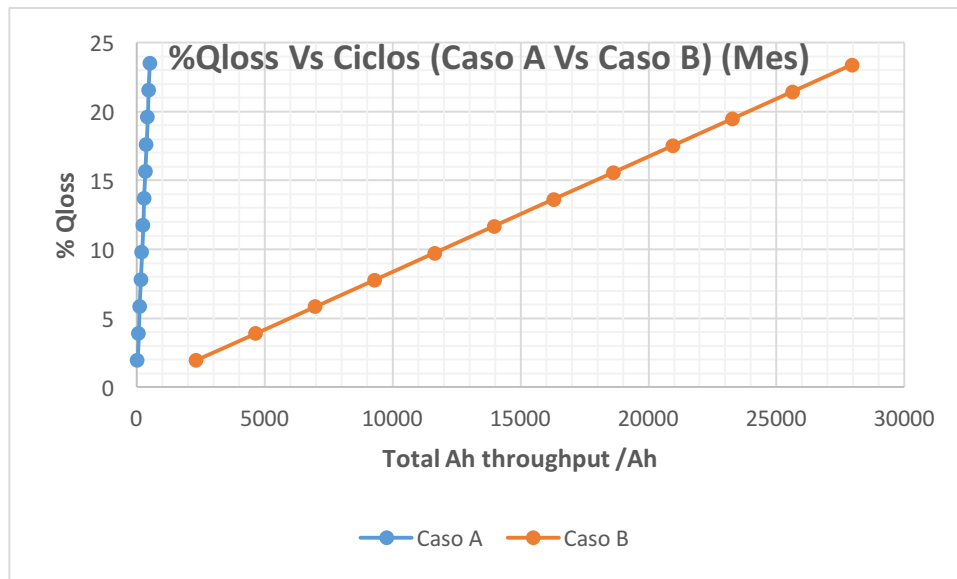


Figura 29: Comparativa %Qloss Vs Ciclos. Modelo G. Caso A vs Caso B (Mes).

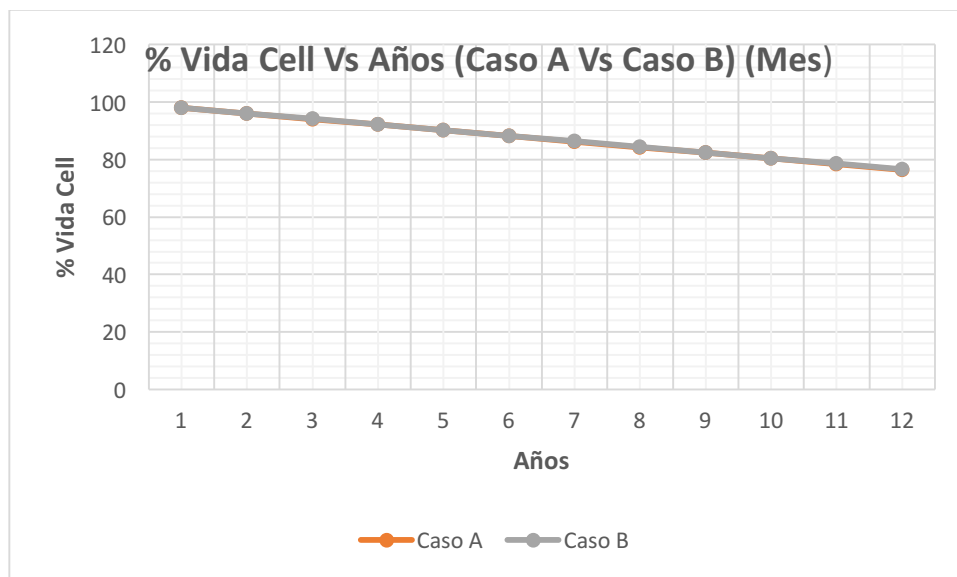


Figura 30: Comparativa % Vida Cell Vs Años. Modelo G. Caso A vs Caso B (Mes).

8.6 Resultados Combinación modelos A y F

En este modelo no se seguirá la relación comentada en el Anexo VI, sino que seguirá la relación mencionada en el apartado 4.2.2, para replicar el modelo exacto.

8.6.1 Caso A

Tabla 23: Resultados Combinación Modelo A y F. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,21	3,06	3,06	96,94
2	88,43	3,07	6,13	93,87
3	132,64	3,07	9,19	90,81
4	176,86	3,07	12,26	87,74
5	221,07	3,07	15,33	84,67
6	265,28	3,07	18,39	81,61
7	309,50	3,07	21,46	78,54

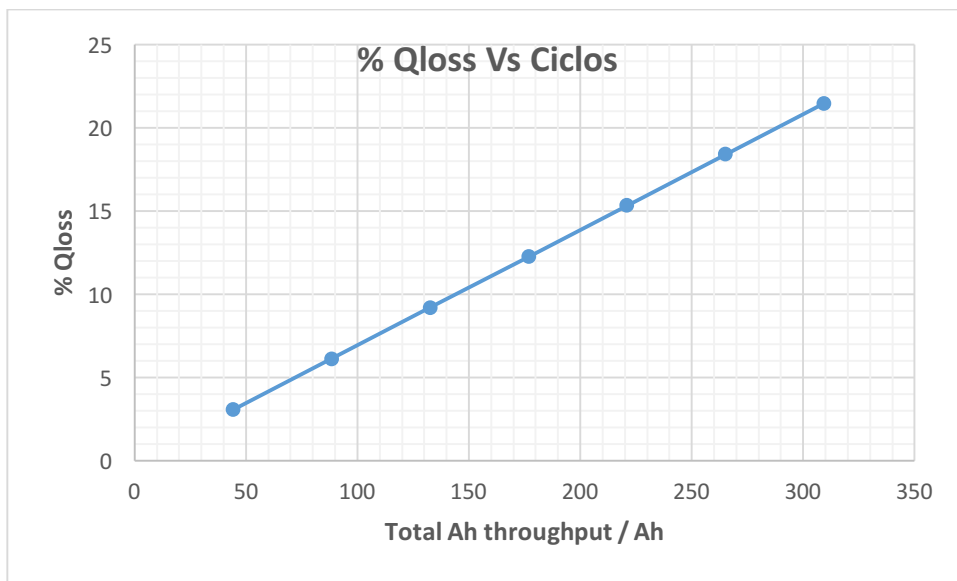


Figura 31: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y F. Caso A.

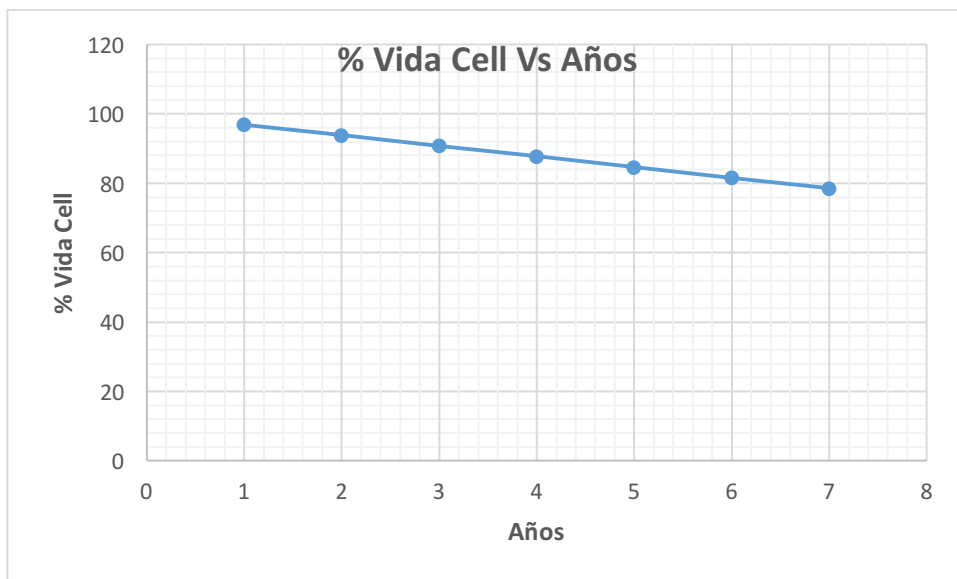


Figura 32: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y F. Caso A.

8.6.2 Caso B

Tabla 24: Resultados Combinación Modelo A y F. Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2647,38	43,15	43,15	56,85

8.7 Resultados Combinación modelos A y G

8.7.1 Caso A

Tabla 25: Resultados Combinación Modelos A y G. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,21	1,16	1,16	98,84
2	88,43	1,16	2,32	97,68
3	132,64	1,16	3,48	96,52
4	176,86	1,16	4,64	95,36
5	221,07	1,16	5,80	94,20
6	265,28	1,16	6,96	93,04
7	309,50	1,16	8,12	91,88
8	353,71	1,16	9,28	90,72
9	397,93	1,16	10,44	89,56
10	442,14	1,16	11,60	88,40
11	486,35	1,16	12,76	87,24
12	530,57	1,16	13,92	86,08
13	574,78	1,16	15,08	84,92
14	619,00	1,16	16,24	83,76
15	663,21	1,16	17,40	82,60
16	707,42	1,16	18,56	81,44
17	751,64	1,16	19,72	80,28
18	795,85	1,16	20,88	79,12
19	840,07	1,16	22,05	77,95

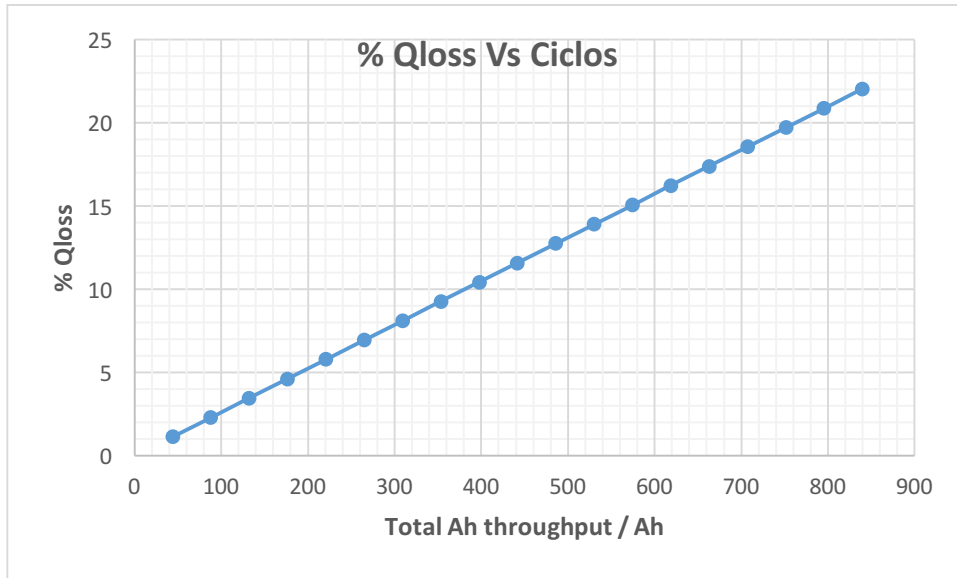


Figura 33: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y G. Caso A.

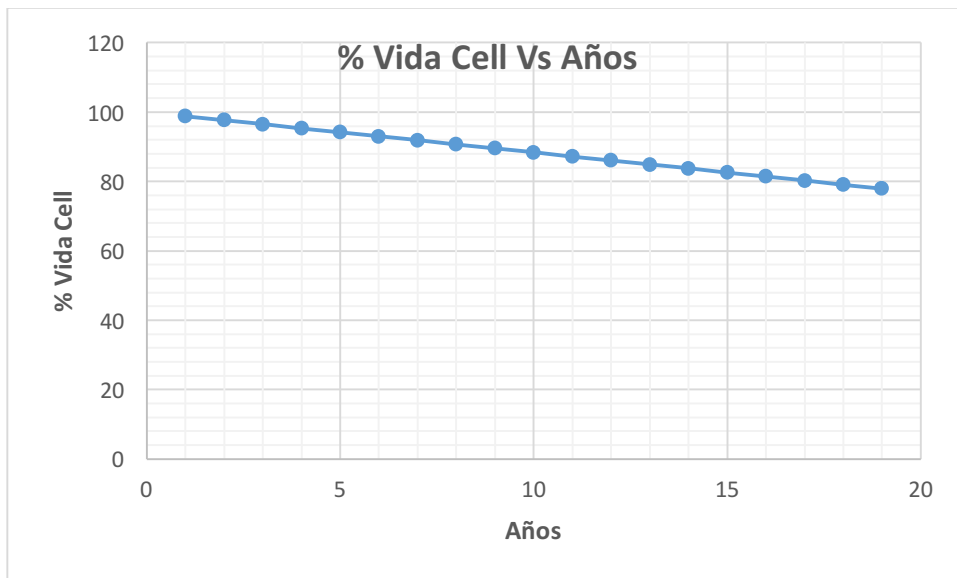


Figura 34: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y G. Caso A.

8.7.2 Caso B

Tabla 26: Resultados Combinación Modelos A y G. Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2647,38	5,44	5,44	94,56
2	5294,75	5,44	10,89	89,11
3	7942,13	5,44	16,33	83,67
4	10589,51	5,44	21,78	78,22
5	13236,88	5,44	27,22	72,78

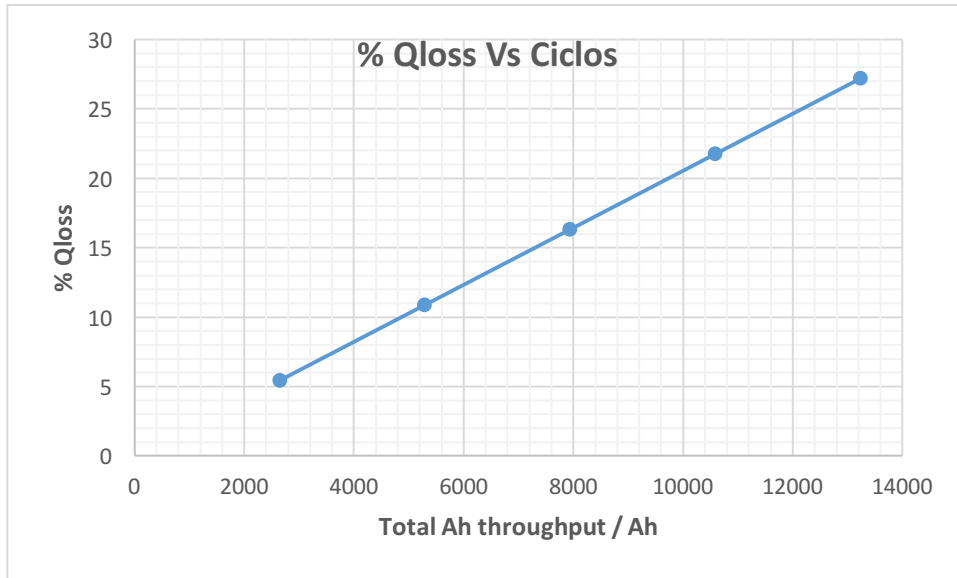


Figura 35: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y G. Caso B.

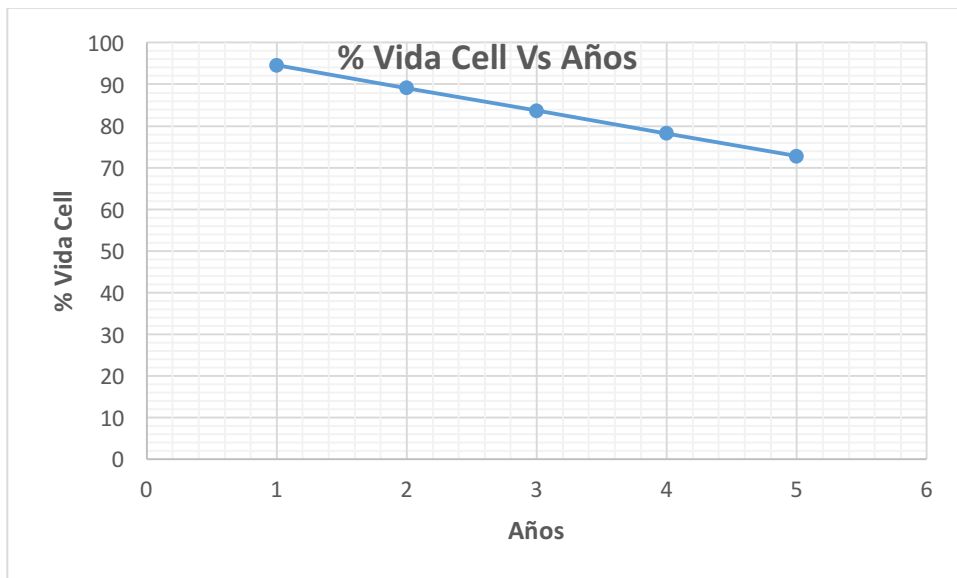


Figura 36: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y G. Caso B.

8.7.3 Comparación Caso A y Caso B

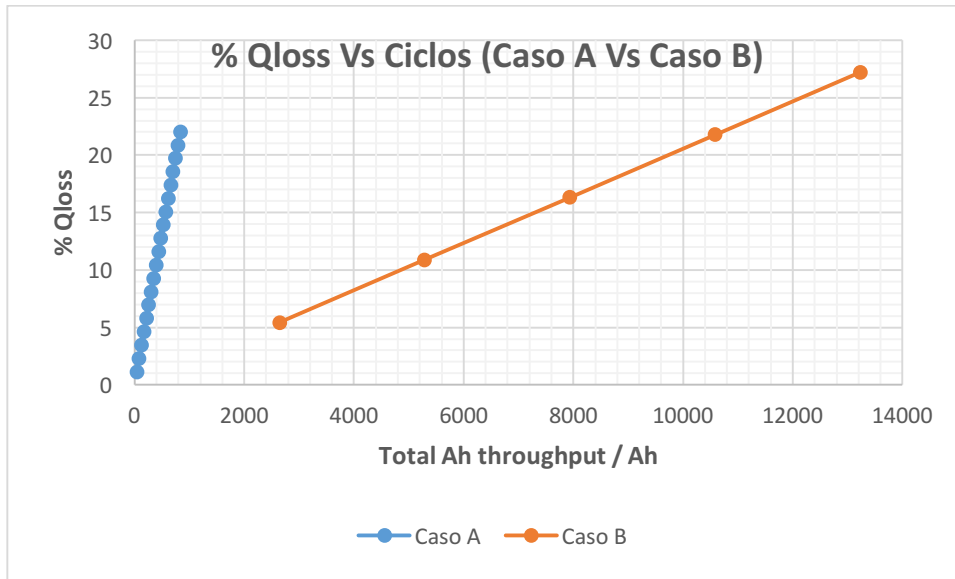


Figura 37: Comparativa % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo A y G. Caso A vs Caso B.

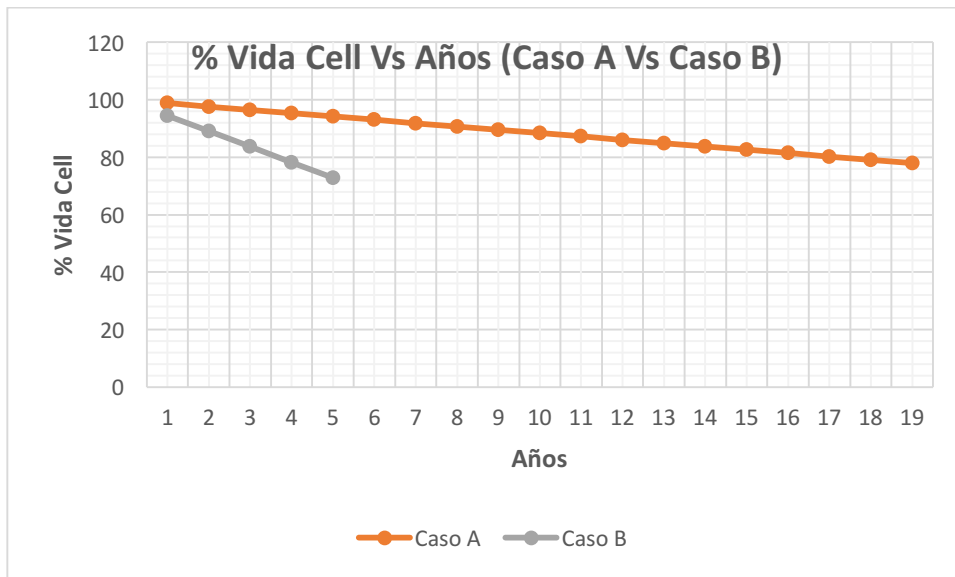


Figura 38: Comparativa % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo A y G. Caso A vs Caso B.

8.8 Resultados Combinación modelos B y F

8.8.1 Caso A

Tabla 27: Resultados Combinación Modelos B y F. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,22	0,61	0,61	99,39
2	88,43	0,61	1,23	98,77
3	132,64	0,61	1,84	98,16
4	176,86	0,61	2,46	97,54
5	221,07	0,61	3,07	96,93
6	265,28	0,61	3,68	96,32
7	309,50	0,61	4,30	95,70
8	353,71	0,61	4,91	95,09
9	397,93	0,61	5,53	94,47
10	442,14	0,61	6,14	93,86
11	486,35	0,61	6,75	93,25
12	530,57	0,61	7,37	92,63
13	574,78	0,61	7,98	92,02
14	619,00	0,61	8,59	91,41
15	663,21	0,61	9,21	90,79
16	707,42	0,61	9,82	90,18
17	751,64	0,61	10,44	89,56
18	795,85	0,61	11,05	88,95
19	840,07	0,61	11,66	88,34
20	884,28	0,61	12,28	87,72
21	928,49	0,61	12,89	87,11
22	972,71	0,61	13,51	86,49
23	1016,92	0,61	14,12	85,88
24	1061,14	0,61	14,73	85,27
25	1105,35	0,61	15,35	84,65
26	1149,56	0,61	15,96	84,04
27	1193,78	0,61	16,57	83,43
28	1237,99	0,61	17,19	82,81
29	1282,21	0,61	17,80	82,20
30	1326,42	0,61	18,42	81,58
31	1370,63	0,61	19,03	80,97
32	1414,85	0,61	19,64	80,36
33	1459,06	0,61	20,26	79,74
34	1503,28	0,61	20,87	79,13

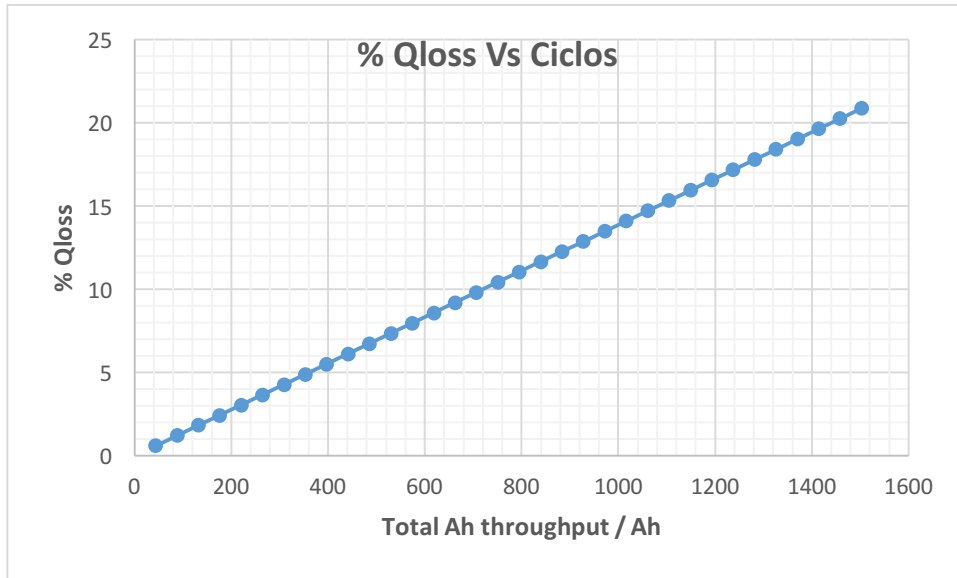


Figura 39: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo B y F. Caso A.

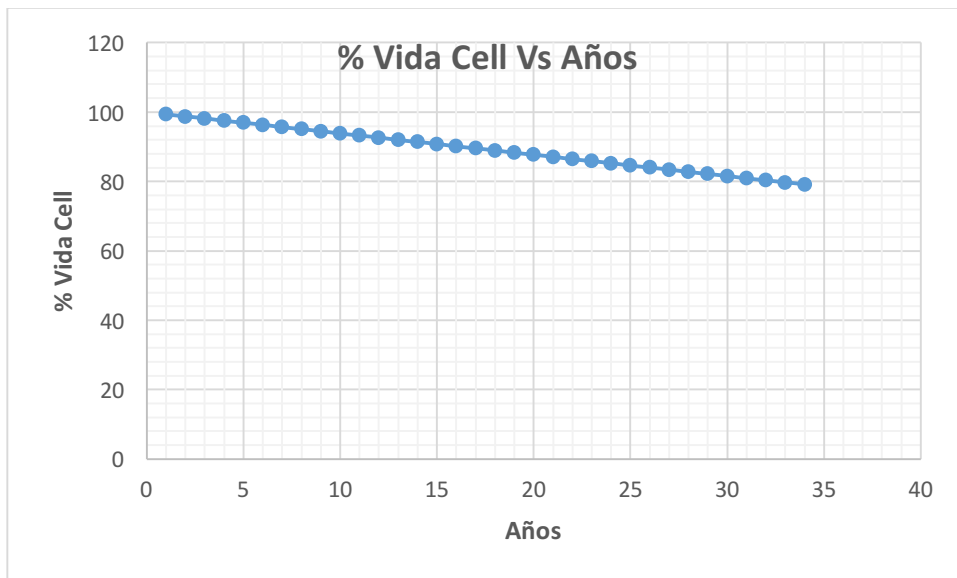


Figura 40: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo B y F. Caso A.

8.8.2 Caso B

Tabla 28: Resultados Combinación Modelos B y F. Caso B.

Años (Calendario)	Años (Ciclo)	Años totales
1	54,21	54,21

8.9 Resultados Combinación modelos B y G

8.9.1 Caso A

Tabla 29: Resultados Combinación Modelos B y G. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,21	1,16	1,16	98,84
2	88,43	1,16	2,32	97,68
3	132,64	1,16	3,48	96,52
4	176,86	1,16	4,64	95,36
5	221,07	1,16	5,80	94,20
6	265,29	1,16	6,96	93,04
7	309,50	1,16	8,12	91,88
8	353,71	1,16	9,28	90,72
9	397,93	1,16	10,44	89,56
10	442,14	1,16	11,60	88,40
11	486,35	1,16	12,76	87,24
12	530,57	1,16	13,92	86,08
13	574,78	1,16	15,08	84,92
14	619,00	1,16	16,24	83,76
15	663,21	1,16	17,40	82,60
16	707,42	1,16	18,56	81,44
17	751,64	1,16	19,72	80,28
18	795,85	1,16	20,88	79,12
19	840,07	1,16	22,05	77,95

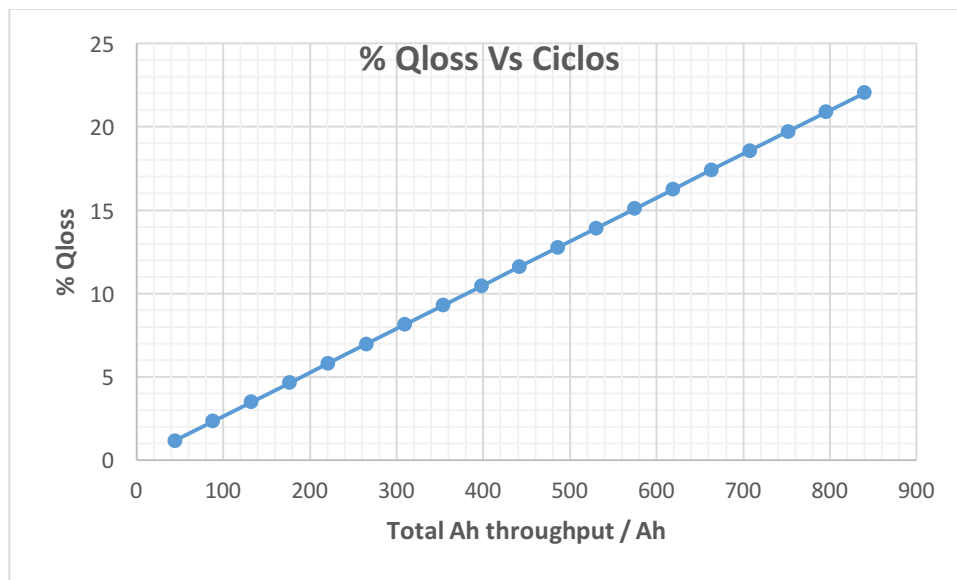


Figura 41: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo B y G. Caso A.

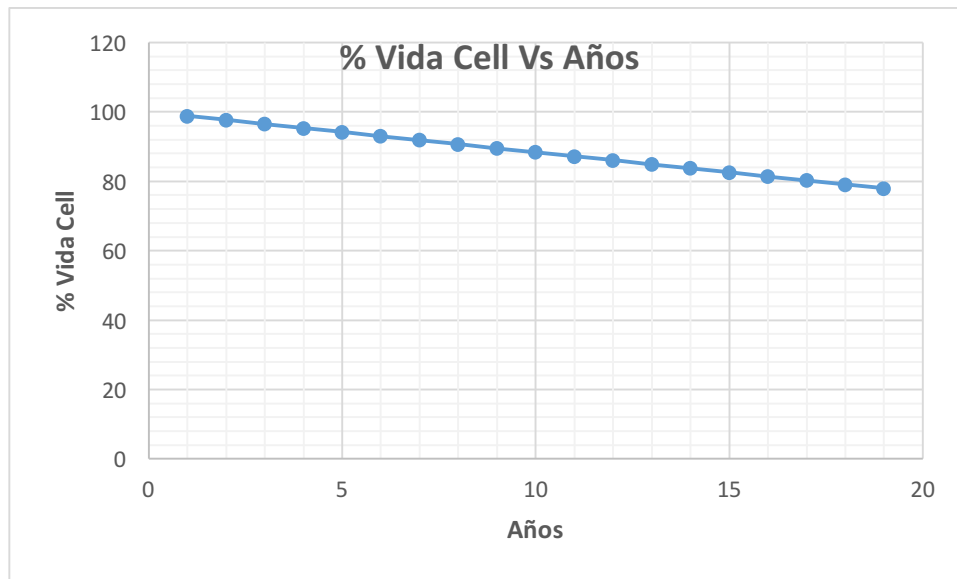


Figura 42: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo B y G. Caso A.

8.9.2 Caso B

Tabla 30: Resultados Combinación Modelos B y G. Caso B.

Años (Calendario)	Años (Ciclo)	Años totales
1	54,21	54,21

8.10 Resultados Combinación modelos C y F8.10.1 Caso A

Tabla 31: Resultados Combinación Modelos C y F. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,21	0,62	0,62	99,38
2	88,43	0,62	1,23	98,77
3	132,64	0,62	1,85	98,15
4	176,86	0,62	2,46	97,54
5	221,07	0,62	3,08	96,92
6	265,28	0,62	3,69	96,31
7	309,50	0,62	4,31	95,69
8	353,71	0,62	4,92	95,08
9	397,93	0,62	5,54	94,46
10	442,14	0,62	6,15	93,85
11	486,35	0,62	6,77	93,23
12	530,57	0,62	7,38	92,62
13	574,78	0,62	8,00	92,00
14	619,00	0,62	8,61	91,39
15	663,21	0,62	9,23	90,77
16	707,42	0,62	9,84	90,16
17	751,64	0,62	10,46	89,54
18	795,85	0,62	11,08	88,92
19	840,07	0,62	11,69	88,31
20	884,28	0,62	12,31	87,69
21	928,49	0,62	12,92	87,08
22	972,71	0,62	13,54	86,46
23	1016,92	0,62	14,15	85,85
24	1061,14	0,62	14,77	85,23
25	1105,35	0,62	15,38	84,62
26	1149,56	0,62	16,00	84,00
27	1193,78	0,62	16,61	83,39
28	1237,99	0,62	17,23	82,77
29	1282,21	0,62	17,84	82,16
30	1326,42	0,62	18,46	81,54
31	1370,63	0,62	19,07	80,93
32	1414,85	0,62	19,69	80,31
33	1459,06	0,62	20,30	79,70
34	1503,28	0,62	20,92	79,08

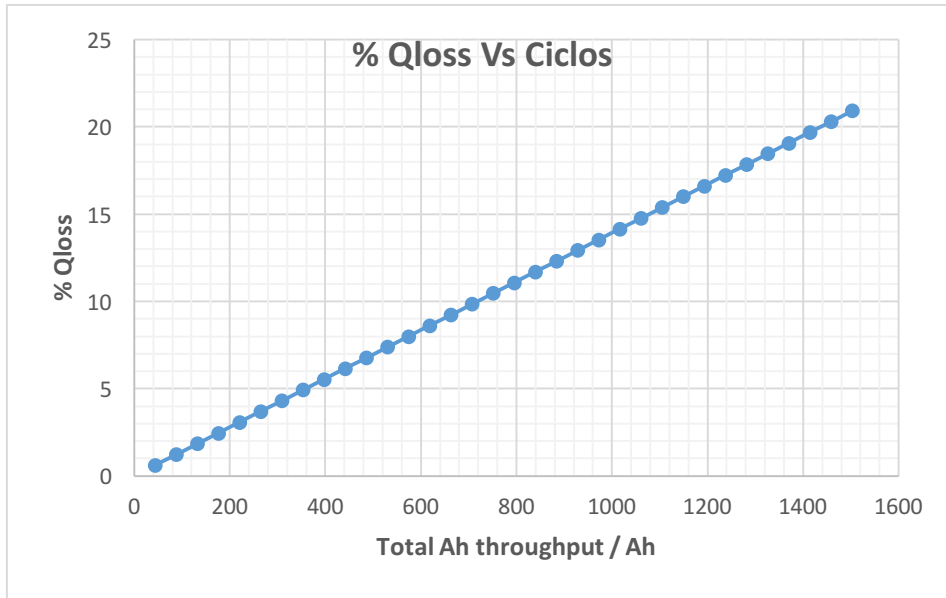


Figura 43: % Qloss Vs Ciclos Combinación Modelo C y F. Caso A.

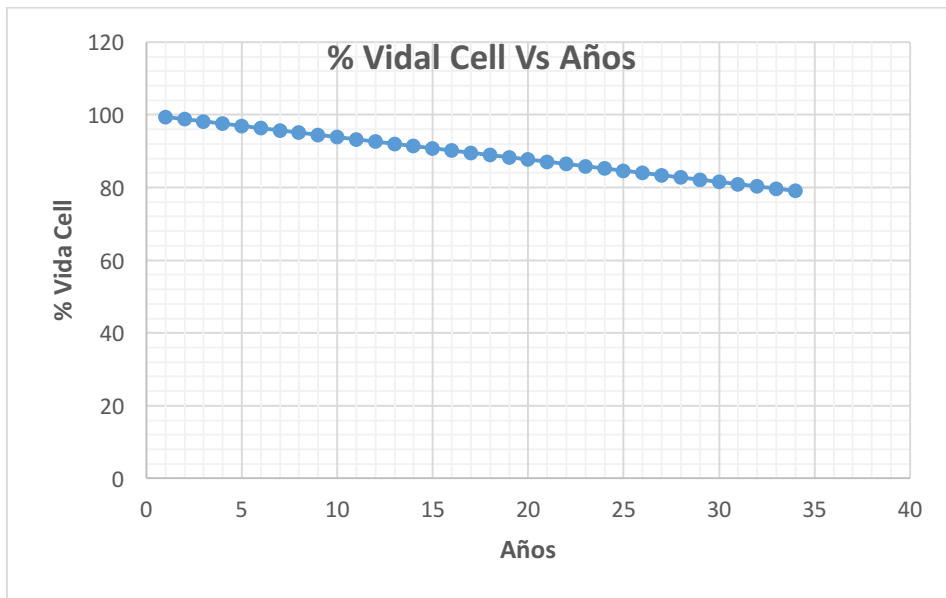


Figura 44: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y F. Caso A.

8.10.2 Caso B

Tabla 32: Resultados Combinación Modelos C y F. Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2647,38	5,78	5,78	94,22
2	5294,75	5,78	11,56	88,44
3	7942,13	5,78	17,35	82,65
4	10589,51	5,78	23,13	76,87
5	13236,88	5,78	28,91	71,09

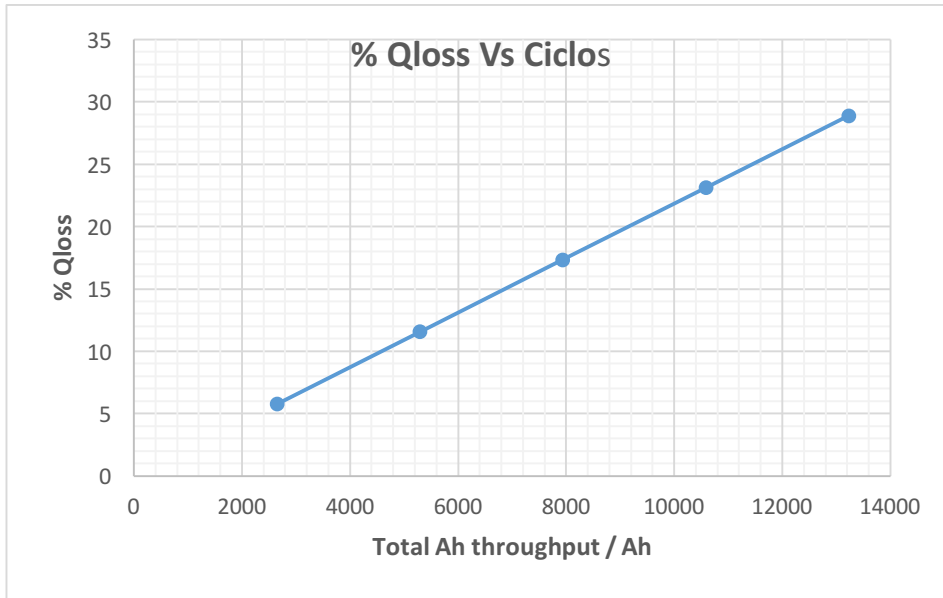


Figura 45: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y F. Caso B.

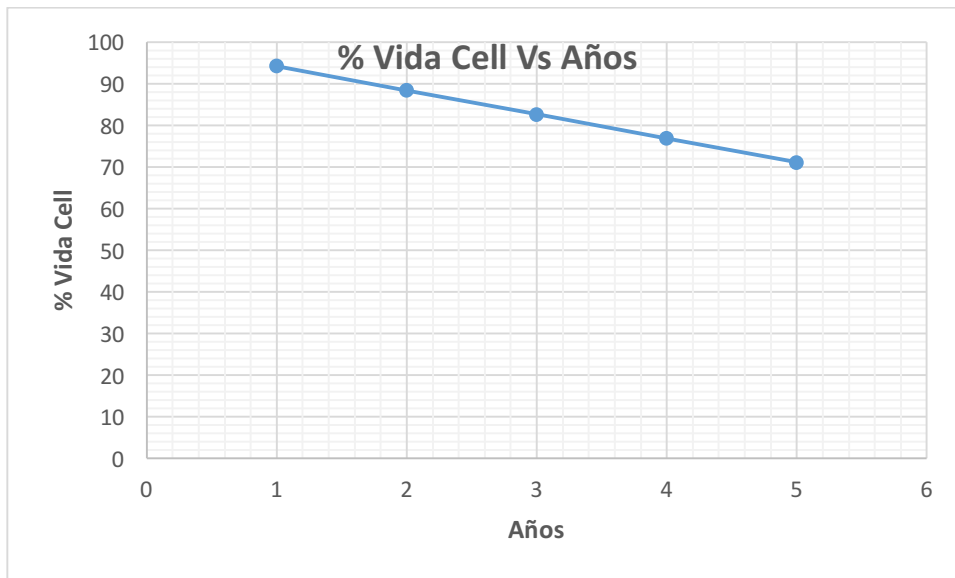


Figura 46: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y F. Caso B.

8.10.3 Comparación Caso A y Caso B

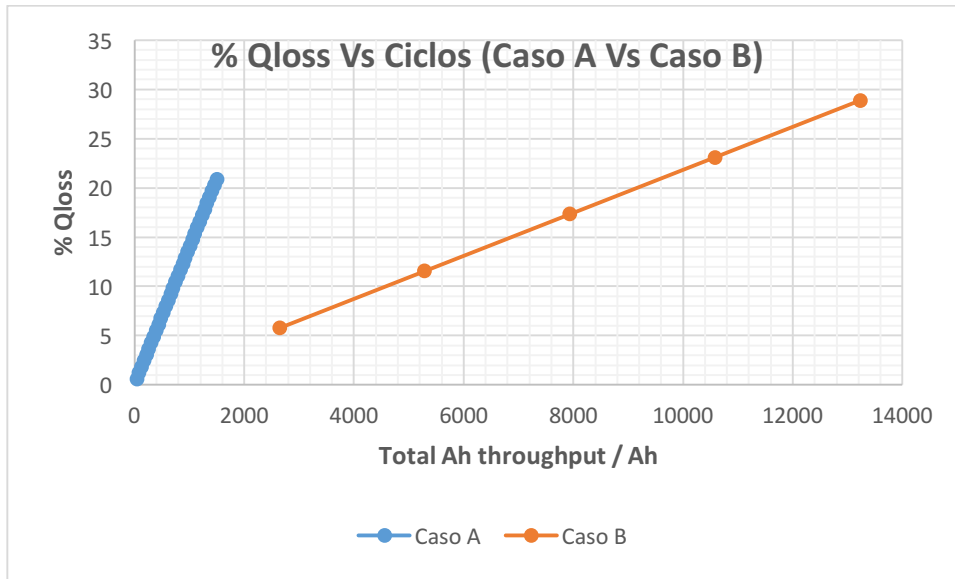


Figura 47: Comparativa % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y F. Caso A vs Caso B.

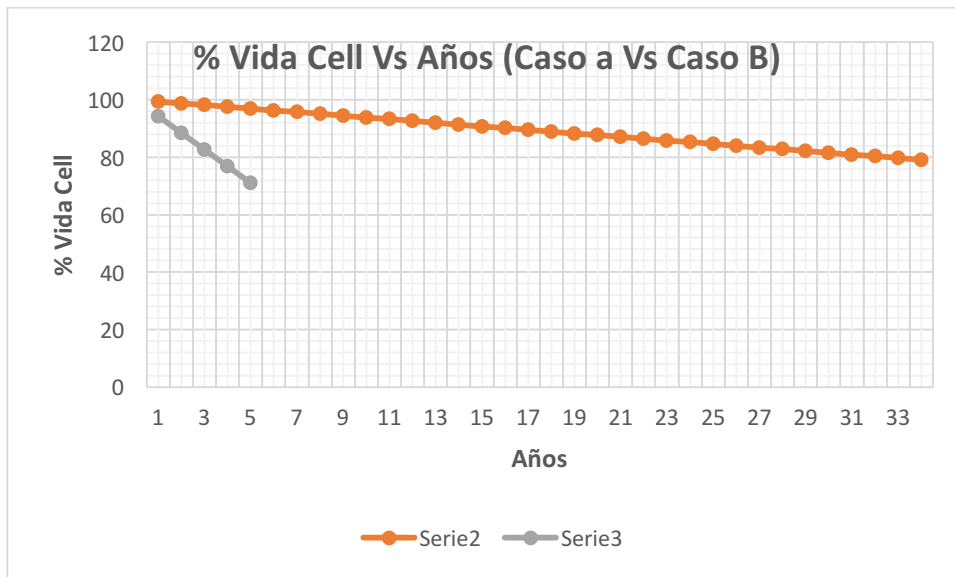


Figura 48: Comparativa % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y F. Caso A vs Caso B.

8.11 Resultados Combinación modelos C y G

8.11.1 Caso A

Tabla 33: Resultados Combinación Modelos C y G. Caso A.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	44,21	1,16	1,16	98,84
2	88,43	1,16	2,32	97,68
3	132,64	1,16	3,48	96,52
4	176,86	1,16	4,64	95,36
5	221,07	1,16	5,80	94,20
6	265,28	1,16	6,96	93,04
7	309,50	1,16	8,12	91,88
8	353,71	1,16	9,28	90,72
9	397,93	1,16	10,44	89,56
10	442,14	1,16	11,60	88,40
11	486,35	1,16	12,76	87,24
12	530,57	1,16	13,92	86,08
13	574,78	1,16	15,08	84,92
14	619,00	1,16	16,24	83,76
15	663,21	1,16	17,40	82,60
16	707,42	1,16	18,56	81,44
17	751,64	1,16	19,72	80,28
18	795,85	1,16	20,88	79,12
19	840,07	1,16	22,05	77,95

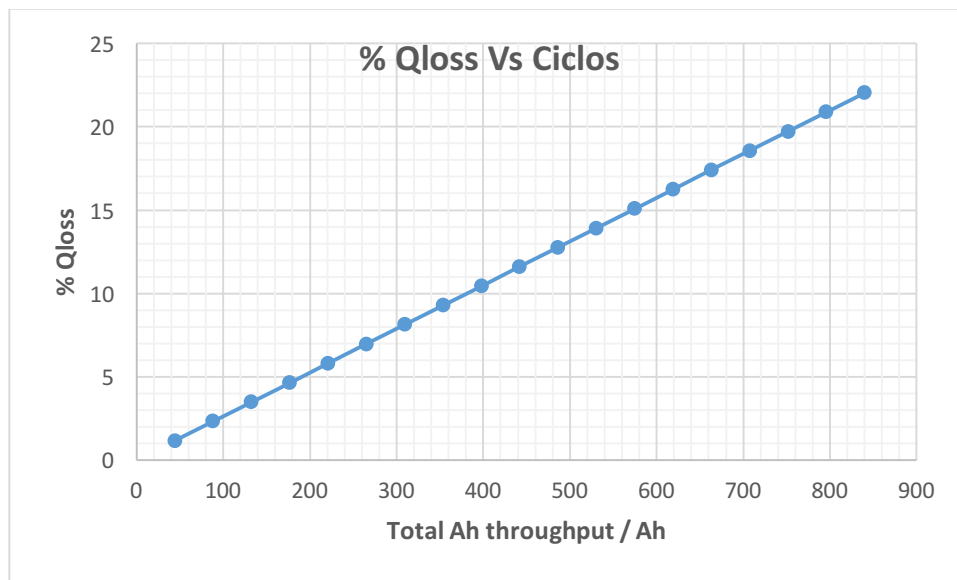


Figura 49: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y G. Caso A.

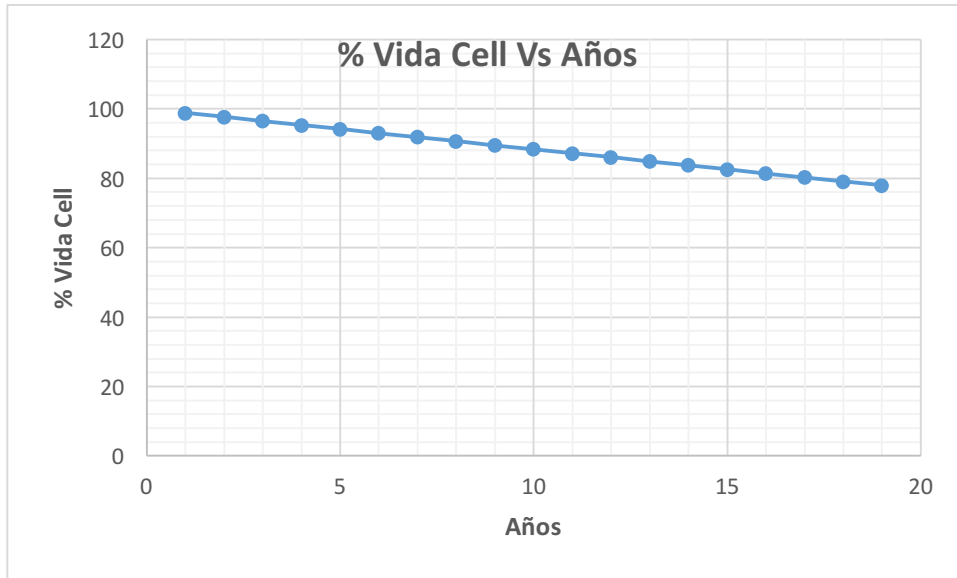


Figura 50: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y G. Caso A.

8.11.2 Caso B

Tabla 34: Resultados Combinación Modelos C y G. Caso B.

Años	Ciclos hasta ahora	% Qloss anual	% Qloss acumulado	% Vida Cell
1	2647,38	6,55	6,55	93,45
2	5294,75	6,55	13,09	86,91
3	7942,13	6,55	19,64	80,36
4	10589,51	6,55	26,18	73,82
5	13236,96	6,55	32,73	67,27

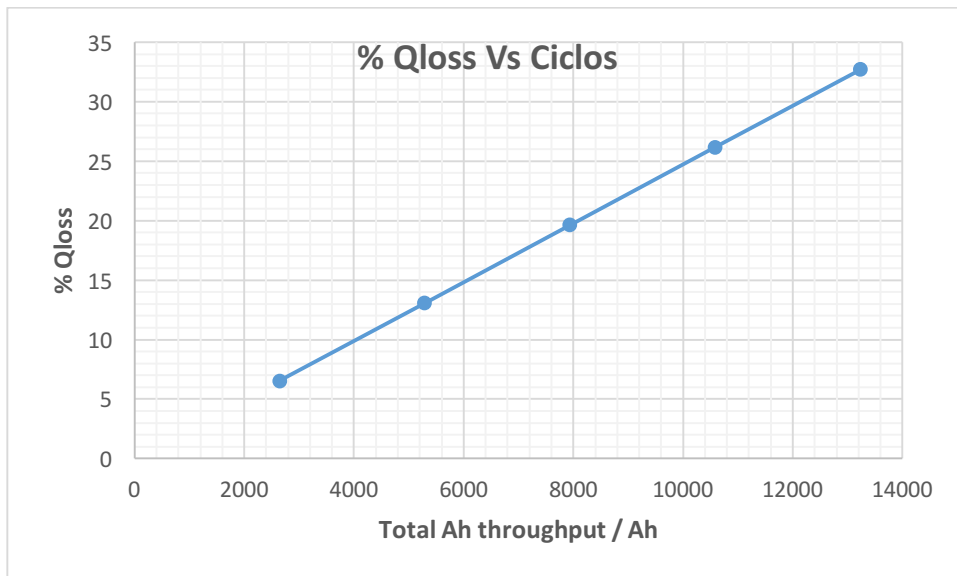


Figura 51: % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y G. Caso B.

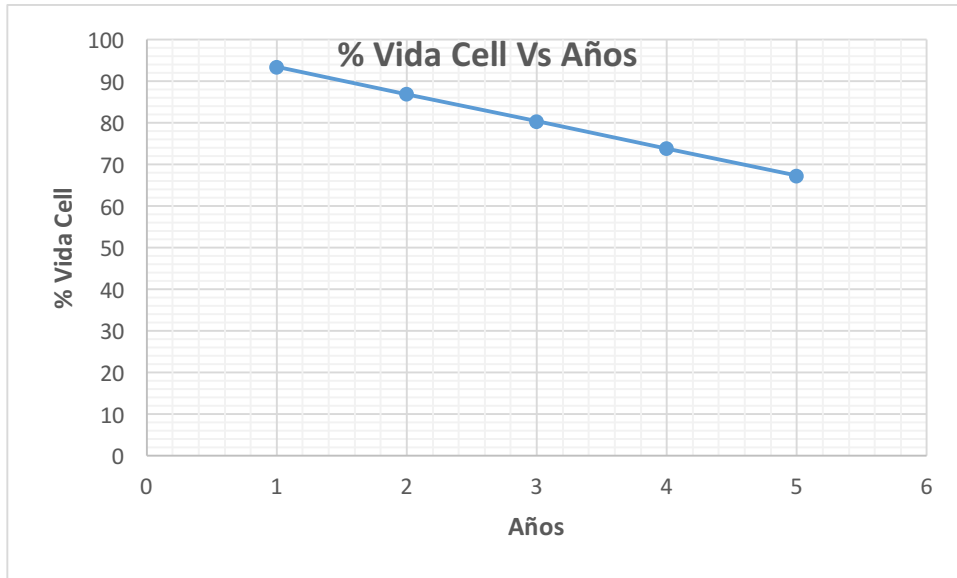


Figura 52: % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y G. Caso B.

8.11.3 Comparación Caso A y Caso B

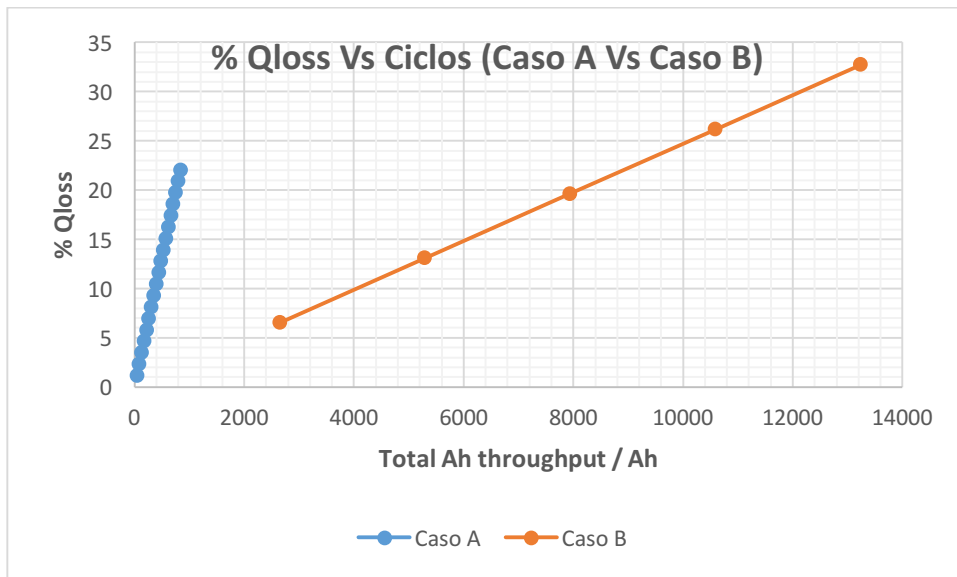


Figura 53: Comparativa % Qloss Vs Ciclos Combinación. Modelo C y G. Caso A vs Caso B.

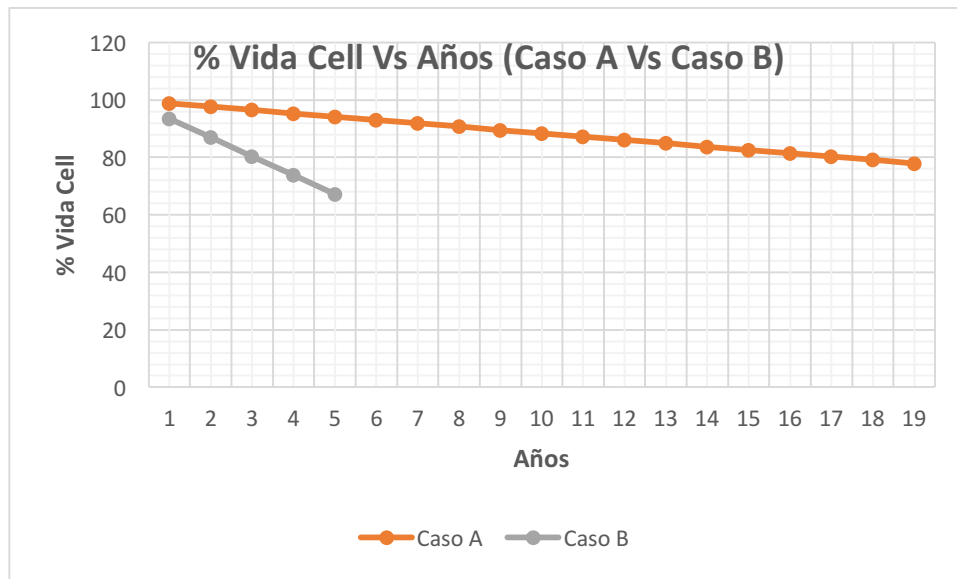


Figura 54: Comparativa % Vida Cell Vs Años Combinación. Modelo C y G. Caso A vs Caso B.

8.12 Comparación modelo A con modelo de Fabricante

8.12.1 Caso A

Tabla 35: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo A. Caso A.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	44,21	56,54

8.12.2 Caso B

Tabla 36: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo A. Caso B.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	2647,38	0,94

8.13 Comparación modelo B con modelo de Fabricante

8.13.1 Caso A

Tabla 37: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo B. Caso A.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	43,82	57,06

8.13.2 Caso B

Tabla 38: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo B. Caso B.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	2532,27	0,99

8.14 Comparación modelo C con modelo de Fabricante

8.14.1 Caso A

Tabla 39: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo C. Caso A.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	43,71	57,20

8.14.2 Caso B

Tabla 40: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo C. Caso B.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	2329,69	1,07

8.15 Comparación modelo F con modelo de Fabricante

8.15.1 Caso A

Tabla 41: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo F. Caso A.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	44,21	56,54

8.15.2 Caso B

Tabla 42: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo F. Caso B.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	2647,38	0,94

8.16 Comparación modelo G con modelo de Fabricante

8.16.1 Caso A

Tabla 43: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo G. Caso A.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	43,71	57,20

8.16.2 Caso B

Tabla 44: Ciclo equivalente Fabricante/Modelo G. Caso B.

Ciclos según fabricante	Ciclos 1 año Modelo	Años
2500	2329,69	1,07