



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE BATERÍAS DE ION LITIO PARA APLICACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y MICRORREDES**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico  
en Sistemas Eléctricos de Potencia

**Autor:**

Toapanta Hurtado Jeferson Francisco

**Tutor:**

Ing. Jiménez Jiménez Diego Leonardo M.S.c.

**LATACUNGA – ECUADOR**

**2022**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo **TOAPANTA HURTADO JEFERSON FRANCISCO** declaro ser autor del presente proyecto de investigación “**EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE BATERIAS DE ION LITIO PARA APLICACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y MICRORREDES**”, siendo el **Ing. JIMÉNEZ JIMÉNEZ DIEGO LEONARDO M.S.c.** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, es de mi exclusiva responsabilidad.



**Toapanta Hurtado Jeferson Francisco**

**C.C. 1725439606**

## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE BATERIAS DE ION LITIO PARA APLICACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y MICRORREDES”**, de **TOAPANTA HURTADO JEFERSON FRANCISCO**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2022

El Tutor



.....  
Ing. Jiménez Jiménez Diego Leonardo M.S.c.

C.C. 0503493702



## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante **TOAPANTA HURTADO JEFERSON FRANCISCO** con el título de Proyecto de titulación “**EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE BATERIAS DE ION LITIO PARA APLICACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y MICRORREDES**” han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo 2022

Para constancia firman:

.....  
Ing. Suárez Vinueza Rommel Eusebio. MSc. Ing. Cabrera Celi Gabriela Cristina. MSc.

C.C. 1804165353

C.C. 1104683873

.....  
Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio. MSc.

C.C. 0603578956

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios por siempre iluminarme, a pesar de las caídas siempre ha sabido brindarme una luz al final del túnel, ha encontrarles una solución a los problemas.

A mi madre María Hurtado que en todo momento supo cómo guiarme siempre dándome ese aliento de no rendirme, apoyándome en todo momento sin tu ayuda no sería nadie en esta vida gracias por apoyarme en esta etapa muy importante de mi vida.

A mi tío Jaime Hurtado que es como un padre para mí ya que supo cómo llenarme de valores siempre, impulsándome a trabajar a estudiar siempre ha ser un emprendedor en esta vida gracias por apoyarme hasta esta etapa de mi vida.

Al Ing. Diego Jiménez que con su valiosa tutoría y exigencia me ha encaminado de la mejor manera para realizar el presente trabajo de investigación.

## DEDICATORIA

*Hijos, obedezcan en el Señor a sus padres,  
porque esto es justo. «Honra a tu padre y a tu  
madre —que es el primer mandamiento con  
promesa— para que te vaya bien y disfrutes de  
una larga vida en la tierra  
“Efesios 6:1-3”*

**A Dios.**

**A mi madre y mi tío María y Jaime.**

**A mi familia.**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra la evaluación de una metodología que permite modelar la degradación de las baterías de ion litio cuando presentan ciclos de carga y descarga erráticos, es decir cuando se utiliza diferentes rangos de estados de carga a partir de valores reales, el modelo se establece en base a parámetros indicados por el fabricante en su hoja de especificaciones y está enfocado a distintos casos de estudio en el contexto de microrredes y vehículos eléctricos.

El método utilizado parte de un modelo empírico que sirve para describir el comportamiento de la batería durante diferentes ciclos de carga y descarga hasta evidenciar el fin de su vida útil. El modelo presentado determina una degradación fija asumiendo estados de carga simétricos, lo que en la práctica no es real, debido que las baterías se cargan/descargan en distintos ciclos de uso. Luego se realiza una actualización de la degradación inicial mediante parámetros de escalamiento y en base a un modelo basado en similitud es posible encontrar la degradación real de la batería para cada ciclo de uso errático.

Por último se logró simular los distintos casos de estudio en el software Matlab en los cuales se evidenció la degradación de las baterías de ion litio, por lo que se comprobó el adecuado funcionamiento del modelo ya que se pudo evidenciar un incremento del número de los ciclos de vida útil al compararlos con los datos expuestos por el fabricante, cabe aclarar que las simulaciones realizadas están bajo varios supuestos de las baterías de ion litio como que el sistema se encuentra dentro de un control de temperatura a 25°C.

**Palabras Clave:** Modelo de degradación, baterías de ion-litio, microrredes, vehículos eléctricos.

## ABSTRACT

The present research work shows the evaluation of a methodology that allows modeling the degradation of lithium ion batteries when they present erratic charge and discharge cycles, that is, when different ranges of charge states are used from real values, the model It is established based on parameters indicated by the manufacturer in its specification sheet and is focused on different case studies in the context of microgrids and electric vehicles.

The method used is based on an empirical model that serves to describe the behavior of the battery during different charge and discharge cycles until the end of its useful life is evidenced. The presented model determines a fixed degradation assuming symmetrical states of charge, which in practice is not real, since the batteries are charged/discharged in different cycles of use. Then, an update of the initial degradation is carried out using scaling parameters and based on a model based on similarity, it is possible to find the real degradation of the battery for each cycle of erratic use.

Finally, it was possible to simulate the different case studies in the Matlab software in which the degradation of lithium ion batteries was evidenced, for which the proper functioning of the model was verified since an increase in the number of cycles could be evidenced. of useful life when comparing them with the data presented by the manufacturer, it should be clarified that the simulations carried out are under various assumptions of lithium ion batteries, such as that the system is within a temperature control of 25°C.

**Keywords:** Degradation model, lithium-ion batteries, microgrids, electric vehicles.



## ***AVAL DE TRADUCCIÓN***

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del artículo científico cuyo título versa: **“EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE BATERÍAS DE ION LITIO PARA APLICACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y MICRORREDES.”** presentado por: **Toapanta Hurtado Jeferson Francisco**, estudiante de la Carrera de **Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia** perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 21 marzo del 2022

Atentamente,



CENTRO  
DE IDIOMAS

Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**

**CI: 0502666514**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1	EL PROBLEMA .....	3
2.1.1	Situación Problemática:.....	3
2.1.2	Formulación del problema:.....	3
2.2	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	3
2.2.1	Objeto de estudio .....	3
2.2.2	Campo de acción .....	4
2.3	BENEFICIARIOS: .....	4
2.3.1	Directos .....	4
2.3.2	Indirectos .....	4
2.4	JUSTIFICACIÓN: .....	4
2.5	HIPÓTESIS: .....	5
2.6	OBJETIVOS: .....	5
2.6.1	General: .....	5
2.6.2	Específicos: .....	5
2.7	SISTEMA DE TAREAS.....	6
3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	7
3.1	ANTECEDENTES .....	7
3.2	MARCO CONCEPTUAL REFERENCIAL .....	7
3.2.1	Las Baterías .....	7
3.2.2	Factores que afectan la vida útil de las baterías de Litio.....	11
3.2.2.1	Ciclos de vida en las baterías de litio .....	11
3.2.2.2	Hinchamientos de las celdas de litio.....	11
3.2.2.3	Efectos de cargas y descargas a las baterías de litio.....	12
3.2.3	Sistema de gestión de batería (BMS) .....	12
3.2.4	Terminología usada en el ámbito de las baterías.....	13
3.2.5	Batería de Ion Litio.....	16
3.2.6	Funcionamiento de la batería de ion litio .....	17

3.2.7	Proceso de envejecimiento .....	19
3.2.8	Modelos de degradación de baterías de Ion litio .....	20
3.2.8.1	Modelos Empíricos.....	20
3.2.8.2	Modelo Electroquímico .....	21
3.2.8.3	Modelos Físicos.....	22
3.2.8.4	Modelos Abstractos .....	22
3.2.8.5	Otros modelos.....	22
3.2.9	Modelos de degradación utilizado.....	23
3.2.9.1	SBM (Modelos basado en similitud) y los 3 vecinos cercanos (K-nearest neighbors).....	27
3.2.10	Aplicaciones de las baterías de Ion Litio.....	29
3.2.11	Los vehículos eléctricos .....	30
3.2.11.1	Aplicación de las baterías de ion en vehículos eléctricos.....	31
3.2.12	Microrred aislada.....	33
3.2.12.1	Características de la microrred .....	33
3.2.12.2	Aplicación de las baterías de ion litio en las microrredes .....	34
3.2.13	Restricciones del SOC para extender la vida útil de la batería .....	35
3.2.14	Método de Montecarlo .....	36
4	MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
4.1	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	37
4.2	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE UNA BATERÍA DE ION - LITIO .....	37
4.2.1	Desarrollo del gráfico de dispersión.....	42
4.2.2	Metodología para realizar una función que me permita calcular el Eta para distintos rangos de oscilación de la batería.....	46
4.2.3	Metodología usada en el caso de estudio de microrredes y vehículos eléctricos.....	47
4.2.4	Metodología para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de una microrred real .....	48
4.2.5	Metodología para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de un vehículo eléctrico aplicando la técnica Montecarlo. ....	49
4.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	50
4.3.1	Sinterización de la información.....	50
4.3.2	Software Matlab .....	51

4.3.3	Datasheets.....	51
4.3.4	Artículos científicos .....	51
4.3.5	Modelo matemático .....	51
4.3.5.1	Formulación matemática .....	51
4.3.5.3	Montecarlo usado en el caso de estudio de los vehículos eléctricos .....	51
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	52
5.1	VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO EN EL CASO DE ESTUDIO DE LAS MICRORREDES .....	52
5.1.1	Datos de SOC altos y SOC bajos de un despacho económico de una microrred real	52
5.1.2	Análisis económico de la batería LiFeO4 en el caso de estudio de la Microrred .....	55
5.2	VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO EN EL CASO DE ESTUDIO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS .....	57
5.2.1	Datos de SOC altos y SOC bajos de un vehículo eléctrico .....	57
5.2.2	Análisis económico de la batería BMWi3 en el caso de estudio del vehículo eléctrico .....	61
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	63
6.1	CONCLUSIONES .....	63
6.2	RECOMENDACIONES .....	64
7	BIBLIOGRAFÍA.....	65
8	ANEXOS.....	68

## Índice de figuras

<b>Figura 3.1.</b> Partes de una batería [3].....	8
<b>Figura 3.2.</b> Años de Comercialización de los diferentes tipos de baterías [3]. .....	9
<b>Figura 3.3.</b> Densidad de energía gravimétrica y volumétrica de diferentes tipos de tecnología de baterías recargables [4] .....	10
<b>Figura 3.4.</b> Degradación de la batería respecto al SOC y al SOH [9]. .....	15
<b>Figura 3.5.</b> Proceso de carga/descarga y estructura de una batería de litio [11]. .....	18
<b>Figura 3.6.</b> Dependencia del envejecimiento con el SoC [11]. .....	19
<b>Figura 3.7.</b> Vida útil de Panasonic NCR18650B [6]. .....	24
<b>Figura 3.8.</b> Ejemplo de la eficiencia de Coulomb durante el ciclado [6]. .....	25
<b>Figura 3.9.</b> K-Diagrama de dispersión del vecino más cercano [6]. .....	28
<b>Figura 3.10.</b> Prototipo de vehículo eléctrico presentado por BMW en 1969 [14]. .....	31
<b>Figura 3.11.</b> Modelos de vehículos 100% eléctricos Hyundai Ioniq-BMW i3-Tesla Model S [8]. .....	32
<b>Figura 3.12.</b> Partes Nissan LEAF 1era generación [8]. .....	33
<b>Figura 3.13.</b> Diagrama de una Microrred con base en ERNC [18]. .....	33
<b>Figura 3.14.</b> Clasificación de las microrredes [17]. .....	34
<b>Figura 3.15.</b> Degradación de la capacidad energética para diferentes políticas operativas. La línea roja horizontal indica el 75% de la capacidad de energía nominal [16]. .....	36
<b>Figura 4.1.</b> Diagrama de flujo de la metodología para la evaluación de un modelo de degradación de una batería. ....	38
<b>Figura 4.2.</b> Dimensiones de la batería LIR18650 [20]. .....	39
<b>Figura 4.3.</b> Características cíclicas de la batería LIR18650 [20]. .....	40
<b>Figura 4.4.</b> Degradación de la batería LIR18650 representado en % de la capacidad original .....	41
<b>Figura 4.5.</b> Degradación de la batería LIR18650 representado en mAh de su capacidad original.....	41
<b>Figura 4.6.</b> Representación de la longitud (SR), promedio (SR) y el SOC alto_bajo. ....	43
<b>Figura 4.7.</b> Diagrama de dispersión de los 3 vecinos más cercanos. ....	44
<b>Figura 4.8.</b> Distintos Swing Range.....	45
<b>Figura 4.9.</b> Diagrama de flujo de la metodología usada en la programación para el ingreso de SOC alto y SOC bajo para distintos Swing Range.....	46

<b>Figura 4.10.</b> Metodología utilizada en el caso de estudio y microrredes .....	47
<b>Figura 4.11.</b> Diagrama de flujo secuencia de pasos para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de una microrred real. ....	48
<b>Figura 4.12.</b> Diagrama de flujo de la metodología usada en la programación para el caso de estudio en vehículos eléctricos. ....	50
<b>Figura 5.1.</b> Degradación de la batería LIR18650 aplicado en el caso de estudio de la microrred representado en su capacidad nominal normalizada en porcentaje. ....	53
<b>Figura 5.2.</b> Degradación de la batería LBS-12-100(LiFePO4) en Ah.....	54
<b>Figura 5.3.</b> Degradación de la batería LBS-12-100(LiFePO4) aplicado en el caso de estudio de la microrred representado en su capacidad nominal normalizada en Ah. ....	55
<b>Figura 5.4.</b> Degradación de la batería LIR18650 aplicado en el caso de estudio de un vehículo eléctrico representado en su capacidad nominal normalizada en porcentaje. ....	58
<b>Figura 5.5.</b> Datos del fabricante de la batería BMW i3 [8]. ....	58
<b>Figura 5.6.</b> Degradación de la batería BMW i3 representado en porcentaje de la capacidad original según el fabricante.....	59
<b>Figura 5.7.</b> Degradación de la batería BMW i3 representado en Ah de la capacidad original según el fabricante. ....	60
<b>Figura 5.8.</b> Degradación de la batería BMW i3 aplicado en el caso de estudio del vehículo eléctrico representado en su capacidad nominal normalizada en porcentaje. ....	61

## Índice de tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Sistema de tareas en relación con los objetivos específicos. ....	6
<b>Tabla 3.1.</b> Características de tecnologías de baterías recargables [4].....	11
<b>Tabla 3.2.</b> Ventajas y desventajas de las baterías de Ion litio [12].....	17
<b>Tabla 3.3.</b> Comparación de los diferentes modelados con respecto a las baterías de Ion Litio. .....	23
<b>Tabla 3.4.</b> Factores de escalada para tres casos de degradación [6]. ....	29
<b>Tabla 4.1.</b> Características básicas de la batería LIR18650 [20]. ....	39
<b>Tabla 4.2.</b> Prestaciones eléctricas de la batería LIR18650 [20]. ....	40
<b>Tabla 4.3.</b> Cálculos para la representación gráfica del diagrama de dispersión. ....	43
<b>Tabla 4.4.</b> Cálculos de la eficiencia de Coulomb usando el SBM y la metodología de los 3 vecinos más cercanos.....	44
<b>Tabla 4.5.</b> Distintos Swing Range .....	45
<b>Tabla 5.1.</b> Datos técnicos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) [5]. ....	53
<b>Tabla 5.2.</b> Resultados obtenidos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) según el fabricante. ...	54
<b>Tabla 5.3.</b> Resultados obtenidos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) en el caso de estudio de las microrredes.....	54
<b>Tabla 5.4.</b> Datos obtenidos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) según el fabricante. ....	55
<b>Tabla 5.5.</b> Resultados obtenidos aplicando nuestro modelo en el caso de estudio de las microrredes. ....	55
<b>Tabla 5.6.</b> Aplicación de la regla de tres en porcentaje. ....	56
<b>Tabla 5.7.</b> Aplicación de la regla de tres en USD.....	56
<b>Tabla 5.8.</b> Resultados obtenidos de la batería del vehículo eléctrico BMW i3 en porcentaje según el fabricante. ....	59
<b>Tabla 5.9.</b> Resultados obtenidos de la batería del vehículo eléctrico BMW i3 en Ah según el fabricante. ....	59
<b>Tabla 5.10.</b> Resultados obtenidos de la batería BMW i3 en el caso de estudio de los vehículos eléctricos.....	60
<b>Tabla 5.11.</b> Datos obtenidos de la batería BMW i3 según el fabricante. ....	61
<b>Tabla 5.12.</b> Resultados obtenidos aplicando nuestro modelo en el caso de estudio de los vehículos eléctricos.....	61
<b>Tabla 5.13.</b> Aplicación de la regla de tres en porcentaje. ....	62

<b>Tabla 5.14.</b> Aplicación de la regla de tres en USD.....	62
---	----

# 1 INFORMACIÓN GENERAL

**Título:** EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE BATERIAS DE ION-LITIO PARA APLICACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y MICRORREDES

**Fecha de inicio:** Octubre 2021

**Fecha de finalización:** Marzo 2022

**Lugar de ejecución:** Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

**Facultad que auspicia:** Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

**Carrera que auspicia:** Carrera de Ingeniería Eléctrica.

**Proyecto de Investigación Vinculado:** Desarrollo de sistemas para el abastecimiento y uso del servicio de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

## **Equipo de Trabajo:**

Tutor: Jiménez Jiménez Diego Leonardo

Estudiante: Toapanta Hurtado Jeferson Francisco

Grupo de Investigación: Sistemas Eléctricos de potencia

**Área de Conocimiento:** 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

**Línea de investigación:** Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:** Sublínea 4: Inteligencia artificial y modelación de sistemas.

1. Sistemas inteligentes para el ahorro de energía
2. Modelación y simulación de sistemas de energía eléctrica

## 2 INTRODUCCIÓN

Al pasar los años el compromiso mundial con el medio ambiente ha buscado reducir significativamente las emisiones de carbono en el corto plazo y ha favorecido en el desarrollo de tecnologías sustentables, como los vehículos eléctricos y microrredes. Para su funcionamiento uno de los elementos claves desde sus inicios han sido los sistemas de almacenamiento de energía. Por ello se encuentra en los mercados mundiales variedades de baterías recargables.

Las baterías de ion litio en la actualidad son utilizadas para gran cantidad de aplicaciones, tanto para equipos electrónicos (móviles, ordenadores), como para vehículos eléctricos, microrredes, como factor común entre ellas se encuentra su elevada densidad de energía y prácticamente nula autodescarga. Además, por ser uno de los tipos más estudiados, su coste es cada vez menor, al igual que su peso y tamaño, lo que le hace sean idóneas para su uso en vehículos eléctricos y microrredes.

Las celdas de ion-litio se consideran las mejores entre todos los tipos de baterías debido a sus características y rendimiento superiores. Los impactos ambientales positivos asociados a su uso, principalmente su potencial de reciclaje ha influido en el interés de nuevas investigaciones para mejorar las tecnologías inherentes a su desarrollo [1].

Este tipo de baterías se han vuelto muy destacadas debido principalmente a su significativa reducción de precios y al peso ligero con alta densidad de potencia. Cabe recalcar, que el proceso de carga y descarga, y los procesos de reciclaje y restauración no se han resuelto de manera satisfactoria. Es por ello que en este trabajo de investigación se aborda una de las principales problemáticas, centrándose en los factores que conllevan al envejecimiento y degradación de las celdas constitutivas de un sistema de almacenamiento, lo cual está relacionado a la gestión de los procesos de carga y descarga.

Por lo cual esta investigación será un pilar fundamental en la evaluación de un modelamiento matemático desarrollado por el autor en el software Matlab, obteniendo la degradación de la batería de ion litio para distintos estados de carga en el contexto de los vehículos eléctricos y microrredes en el cual se observará los números de ciclos dados por el fabricante y los números de ciclos obtenidos con la evaluación del modelo antes mencionado.

Esto se logrará a través de la cuantificación y contraste de diversas variables que se encuentre a fin de ofrecer el estado de arte, la evidencia teórica y la información necesaria para el uso de dicho modelo en futuras investigaciones. En esta sección se detalla a través de un análisis teórico de los componentes de formación de una batería y sus características funcionales.

## **2.1 EL PROBLEMA**

### **2.1.1 Situación Problemática:**

Las baterías han sido parte de nuestra vida por más de 100 años. Las cuales han sido usadas en diferentes aplicaciones desde una simple calculadora científica hasta teléfonos, laptops, vehículos eléctricos, microrredes, robots, satélites, etc. Por otra las baterías de Ion litio presenta un serio problema que tiene que ver con la degradación de la capacidad para ciclos de carga/descarga regulares y simétricos, de dichas baterías lo cual presenta diversos inconvenientes en aplicaciones de la vida real.

En la actualidad las baterías de Ion litio se han utilizado con una mayor demanda debido a su alta densidad de energía, su destacada eficiencia energética y cabe recalcar a su prolongado tiempo de vida. Las baterías de ion litio son inofensivos para el planeta, la extracción de este mineral es escaso lo cual genera un problema ecológico y por otro lado también es el reciclaje de las baterías, que no es nada sencillo y de aquí nace la oportunidad de darle una segunda vida útil a las baterías de ion litio ya que, si bien no pueden ser utilizadas en un vehículo eléctrico al 80% de rendimiento, si pueden ser utilizadas en otros múltiples usos como almacenamientos de energía.

### **2.1.2 Formulación del problema:**

A través de una investigación sobre las baterías de Ion litio y su modelo de degradación se plantea lo siguiente ¿Cómo se puede conocer la degradación real de las baterías Ion litio identificando la variación del estado de carga en el contexto de vehículos eléctricos y microrredes?

## **2.2 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.2.1 Objeto de estudio**

La evaluación respecto a su degradación de baterías de Ion litio enfocado para aplicaciones en vehículos eléctricos y microrredes.

## **2.2.2 Campo de acción**

330000 ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 330602 Aplicaciones Eléctricas.

## **2.3 BENEFICIARIOS:**

### **2.3.1 Directos**

El estudiante que realiza el siguiente tema de tesis para obtener su título.

### **2.3.2 Indirectos**

Estudiantes con interés afines al tema de investigación en sus próximas investigaciones.

## **2.4 JUSTIFICACIÓN:**

Una de las grandes problemáticas que presentan los fabricantes en sus hojas de especificaciones de baterías es que informan sobre las degradaciones de manera fija asumiendo estados de carga simétricos, lo que en la práctica no es real, debido a que las baterías se cargan y descargan en distintos ciclos de uso.

El presente trabajo parte de la problemática el cual es la degradación de la batería ya que se debe tener en cuenta el uso que se le da y esto dependerá de la degradación que sufra y por tanto la necesidad de comprar otra, lo que supone un coste muy alto. Por otra parte, el análisis de la degradación de las baterías de ion litio es importante debido a que se busca extender la vida útil de la misma ya que su coste es muy elevado y esto afectaría a su reemplazo futuro.

Los aportes en esta investigación es la evaluación de un modelo matemático en función de la degradación de la batería de Ion litio que está enfocado a vehículos eléctricos y microrredes, lo que nos permite identificar en diversos ciclos cuanto se degrada la batería y también esto será de gran ayuda para los fabricantes de baterías o a su vez los usuarios de las mismas, ya que con la evaluación de degradación de la batería se podría restringir los rangos de cargas y así tener una mayor duración de la batería.

Los resultados de esta investigación serán de gran aporte y sus principales beneficiarios serán estudiantes afines al tema investigado ya que, con la obtención de dicho modelo matemático, podrán partir a futuras investigaciones.

Los dispositivos de almacenamiento de energía son de suma importancia para diversas aplicaciones ya que es el elemento que aporta la autonomía al elemento electrónico. Por otra parte, hay que tener en cuenta los impactos ambientales que genera al medio ambiente

Con esta investigación como utilidad práctica nos permitirá saber en cuantos ciclos de carga y descarga se consideraría una batería degradada en diferentes casos de estudio como lo es las microrredes y los vehículos eléctricos, teniendo en cuenta las especificaciones del fabricante referente a los ciclos de vida de la batería y la evaluación del modelo con lo que se realizara esta investigación y así tener una idea más clara que con el modelo evaluado se puede extender los ciclos de vida de la batería.

La metodología que se emplea en esta investigación es factible ya que se cuenta con referentes teóricos y metodológicos como asesoría por parte del tutor, con respecto al software Matlab se lo puede realizar sin ningún problema ya que es un software propietario y la universidad Técnica de Cotopaxi cuenta con una licencia para el desarrollo de trabajos de investigación.

Este proyecto forma parte del proyecto macro formativo titulado: “Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional” de la carrera de Electricidad.

## **2.5 HIPÓTESIS:**

¿Será posible analizar un modelo matemático de degradación de baterías de Ion litio en aplicaciones de Microrredes y vehículos eléctricos?

## **2.6 OBJETIVOS:**

### **2.6.1 General:**

- Evaluar un modelo de degradación de baterías de Ion- Litio mediante el análisis del estado de carga para su aplicación en el contexto de Microrredes y Vehículos eléctricos.

### **2.6.2 Específicos:**

- Realizar un estado del arte acerca de modelos de degradación de baterías de Ion lito.
- Desarrollar un modelo de degradación de baterías de Ion litio mediante el software Matlab.

- Validar el modelo implementado para su aplicación en el contexto de Microrredes y Vehículos eléctricos.

## 2.7 SISTEMA DE TAREAS

**Tabla 2.1.** Sistema de tareas en relación con los objetivos específicos.

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividad (tareas)</b>	<b>Resultados Esperados</b>	<b>Técnicas, Medios e Instrumentos</b>
Realizar un estado del arte acerca de modelos de degradación de baterías de Ion lito.	Búsqueda de información sobre contribuciones al modelado de baterías por diferentes autores.	Información, definición y antecedentes.	Revisión Bibliográfica, Tesis, Libros, Artículos, Revistas Científicas, Microsoft Word.
Desarrollar un modelo de degradación de baterías de Ion litio mediante el software Matlab	Desarrollo de la programación mediante el Software Matlab.	Simulación del modelo de degradación de la batería de Ion Litio para distintos estados de carga	Software Matlab
Validar el modelo implementado para su aplicación en el contexto de Microrredes y Vehículos eléctricos.	Comprobación de la degradación de las baterías de Ion-Litio aplicándolo a dos casos de estudio en el contexto de vehículos eléctricos y microrredes.	Verificación de la degradación de las baterías de Ion-Litio aplicándolo a dos casos de estudio en el contexto de vehículos eléctricos y microrredes.	Gráficos obtenidos del Software Matlab Artículos, Tesis.

### **3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **3.1 ANTECEDENTES**

El desarrollo de las baterías de litio comenzó a fines de la década de 1950 [2], porque las actividades militares y espaciales requerían baterías con una estructura más pequeña y una densidad de energía más alta que las baterías que existían en ese momento. La reducción de peso que se puede lograr con las baterías de litio también ha impulsado su desarrollo.

Hoy en día, continúa el desarrollo de baterías de iones de litio (BIL). El elemento Litio (Li) se descubrió alrededor de 1818. Sin embargo, para fines prácticos, BIL se originó a principios de la década de 1970 y fue completado por el físico John Goodenough y el químico Stan Whittingham [2]. Se atribuye con éxito comercial de BIL a Sony, que introdujo una videocámara evolutiva con esta batería en 1991.

Así comenzó el crecimiento exponencial de las baterías de iones de litio. Hoy en día, todos disfrutan de los beneficios de estas baterías, que hacen que nuestros dispositivos electrónicos sean más pequeños, más duraderos y potentes. Sin embargo, en algunos casos, la seguridad se ha convertido en el centro de atención.

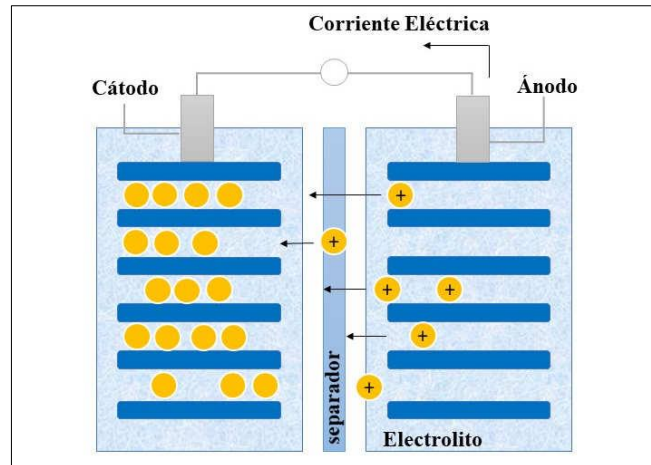
Como se ha observado en los diferentes estudios las baterías de Ion Litio es de suma importancia en la vida diaria de los seres humanos ya que es fundamental para el funcionamiento de varios equipos electrónicos, también cabe recalcar que todas las baterías presentan un problema el cual es su degradación o fin de vida útil debido al proceso de carga y descarga.

#### **3.2 MARCO CONCEPTUAL REFERENCIAL**

##### **3.2.1 Las Baterías**

Una batería puede estar compuesta por dos o más celdas conectadas en serie o en paralelo. Una celda es la unidad primordial de una batería capaz de convertir energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas. Las baterías constituyen de cuatro partes fundamentales que son el ánodo, el cátodo, el separador y el electrolito, ver figura 3.1.

El ánodo sufre una reacción de oxidación durante el proceso de descarga mientras que en el proceso de carga sufre una reacción de reducción. En este caso el cátodo tiene una reacción de reducción durante el proceso de descarga y una reacción de oxidación durante el proceso de carga [3].



**Figura 3.1.** Partes de una batería [3].

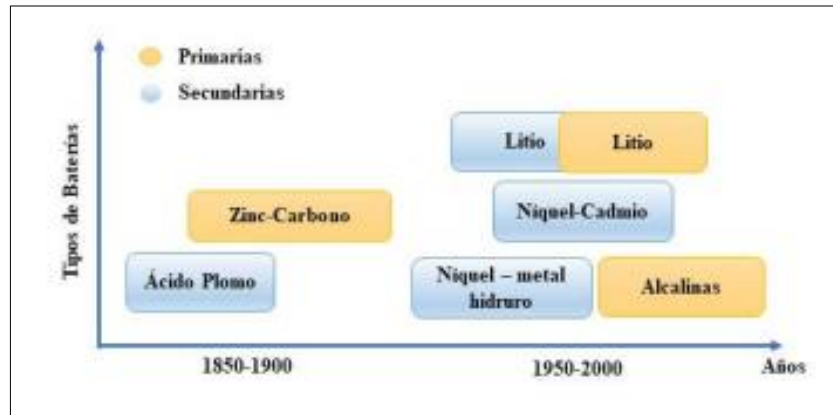
En la reacción de oxidación se presenta una pérdida de electrones mientras que en la reacción de reducción se tiene una ganancia de electrones. Ambas reacciones se complementan y se puede encontrar ejemplos de ellas en diversas actividades que se realizan diariamente como lo son la combustión de la gasolina y el proceso de respiración.

La elección del material que se utilizará en el ánodo y el cátodo de la batería asume un papel importante en su presentación. Por eso la elección del material del ánodo se hace pensando en las cualidades de eficacia como especialista en reducción, gran conductividad, fiabilidad, gasto mínimo y ejecución sencilla, mientras que el material del cátodo se elige pensando en que sea un especialista en oxidación productivo, tenga solidez al llegar al electrolito y que se ocupe de una tensión de funcionamiento.

Habitualmente, las baterías se denominan primarias o secundarias. Las baterías primarias, también conocidas como no recargables son aquellas en las que la respuesta electroquímica no puede revertirse, por ejemplo, solo pueden ser descargadas una sola vez. Las baterías secundarias o recargables como su nombre lo dicen, permiten cargar y descargar la batería un amplio número de veces.

Entre las distintas baterías de zinc carbono, alcalinas (zinc/dióxido de manganeso), zinc/óxido de plata, zinc-aire y litio son consideradas baterías no recargables mientras que las baterías de ácido plomo, níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel-metal hidruro (Ni-MH), ion de litio (Li-Ion) y polímero de litio (LIPo) son consideradas baterías recargables [3].

En la figura 3.2, se muestra la clasificación de las baterías en primarias y secundarias, y de igual forma el periodo de tiempo en el que entraron en el mercado.

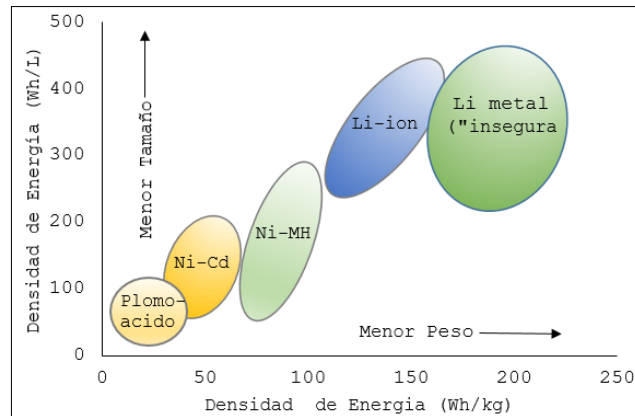


**Figura 3.2.** Años de Comercialización de los diferentes tipos de baterías [3].

Las baterías tienen una importancia extrema, ya que se han utilizado en aparatos versátiles (ordenadores, móviles), cámaras, radios, calculadoras, relojes, juguetes, entre otros. También se han utilizado en campos más complicados como vehículos eléctricos, aviones, máquinas modernas, microrredes, entre otros.

La elección del tipo de batería depende exclusivamente de los requisitos previos de la aplicación en la que se utilizan. Por ejemplo, las baterías de Ion litio son las que más se utilizan en los servicios médicos, los vehículos eléctricos y los aviones por sus características, las baterías de ion litio presentan una elevada densidad energética y prácticamente nula autodescarga, su tamaño y peso hace que sean idóneas para diversas aplicaciones [3].

Existen diferentes exploraciones sobre la investigación de las baterías, sin embargo, actualmente la aplicación más práctica es la batería de Ion litio, ya que tiene cualidades importantes a comparación de otras tecnología, que tiene la versatilidad de las baterías de litio para algunas aplicaciones al presentar un menor peso (densidad de energía gravimétrica) y mayor capacidad de energía por unidades de volumen (densidad energía volumétrica) cuando son comparadas con otros tipos de baterías la como se muestra en la figura 3.3 y tabla 3.1.



**Figura 3.3.** Densidad de energía gravimétrica y volumétrica de diferentes tipos de tecnología de baterías recargables [4].

De la Figura 3.3, se puede observar que la batería de ion- litio presenta menor volumen y peso, lo que sobresale para diversas aplicaciones donde estas variables son sensibles, como por ejemplos en vehículos eléctricos, teléfonos móviles microrredes calculadoras, robots entre otros. Las baterías de iones de litio tienen varias ventajas sobre las tecnologías tradicionales de baterías recargables de NiMH o NiCd: principalmente tiempos de carga cortos y tiempos de descarga largos, cuando no se usan las baterías no pierden su carga.

Una ventaja más de las baterías de iones de litio es que tienen una tasa de autodescarga excepcionalmente baja en el modo de respaldo, y las diferentes características se muestran en la Tabla 3.1, que permiten comprender la razón por la que esta innovación es la más ineludible hoy en día.

Hay que tener en cuenta que, para las aplicaciones, por ejemplo, del punto de apoyo de los vehículos eléctricos, las baterías de ion litio deben tener un dispositivo electrónico de gestión "Battery Management System" (BMS) que controle los factores internos de las celdas señaladas, esto para evitar sobrecargas y temperaturas elevadas que pueden repercutir en el envejecimiento prematuro de la batería [3].

**Tabla 3.2.** Características de tecnologías de baterías recargables [4].

<b>Tipo de Batería</b>	<b>Plomo ácido</b>	<b>Ni-Cd</b>	<b>Ni-MH</b>	<b>Li-ion</b>
<b>Densidad de Energía (Wh/kg)</b>	30-50	45-80	60-120	110-160
<b>Densidad de Potencia</b>	180	150	2501000	1800
<b>Voltaje Nominal (V)</b>	2	1,25	1,25	3,6
<b>Temperatura de funcionamiento(°C)</b>	60	(-20) -60	(-20)-60	(-20)-60
<b>Ciclo de Vida</b>	200-300	1500	300-500	500-1000
<b>Eficiencia de Carga (%)</b>	79	-	-	100
<b>Eficiencia Energética (%)</b>	70	60-90	75	80
<b>Tolerancia de Sobrecarga</b>	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
<b>Autodescarga</b>	Baja	Moderado	Alta	Muy Baja
<b>Estabilidad Térmica</b>	Menos estable	Menos estable	Menos estable	Más estable

Es importante señalar que las baterías de ion-litio presentan problemas que aceleran su envejecimiento cuando son sometidas a desvíos bruscos de temperaturas, ya sean estos muy frío o calientes [4].

### **3.2.2 Factores que afectan la vida útil de las baterías de Litio**

#### **3.2.2.1 Ciclos de vida en las baterías de litio**

La duración de la batería se ve muy afectada por las tasas de carga y descarga. Cuanto más rápida sea la velocidad de carga y descarga, más afectada se verá la batería y menor será su vida útil. Lógicamente, cuanto más suave sea la carga y descarga, más durará [1].

#### **3.2.2.2 Hinchamientos de las celdas de litio**

El hinchamiento de una batería de litio indica que la batería ha perdido algunas de sus características como batería. Además, las células inflamadas pueden ser peligrosas debido al

potencial de explosión. La hinchazón se produce durante la carga o descarga de la batería, especialmente durante la carga, y puede deberse a tres motivos:

- a) El cargador se programó incorrectamente o se utilizó un cargador inadecuado. Es fácil de detectar porque todos los elementos de la batería o celda se hinchan y su tensión final es superior a la tensión máxima de cada elemento.
- b) Un elemento defectuoso: Solo un elemento se ha expandido, lo cual es causado por una falla de fábrica o daño físico (como un golpe o un pinchazo). También es posible que este elemento degenera más rápido que otros elementos.
- c) En baterías que han realizado muchos ciclos de carga y descarga: El cátodo y ánodo no están en buenas condiciones y los elementos se hinchan durante la carga. Normalmente esto no es peligroso, son baterías que siguen funcionando con sus prestaciones muy mermadas [1].

### **3.2.2.3 Efectos de cargas y descargas a las baterías de litio**

Según la arquitectura de la batería, los componentes internos se apilan de la siguiente manera: Cátodo – Separador – Ánodo – Separador – Cátodo – Separador – Ánodo. Entre sus láminas hay electrolitos en las baterías de iones de litio, este electrolito es un líquido, mientras que en las baterías de polímero de litio suele ser un gel.

Cuando una batería de litio se descarga, se oxidará y liberará energía eléctrica la densidad del óxido de litio es menor que la del litio, por lo que es más grande en tamaño y es fácil separar los componentes en capas de la batería. Esto provoca una pérdida de contacto entre las láminas, lo que hace que el electrolito no esté en contacto con el cátodo y el ánodo.

Además, las expansiones y contracciones físicas del elemento van produciendo microgrietas y micro-obturaciones en el cátodo y ánodo lo cual hace que gradualmente según el paso de ciclos la batería vaya perdiendo propiedades [5].

### **3.2.3 Sistema de gestión de batería (BMS)**

El Sistema de Gestión de Baterías (BMS) es una herramienta que es indispensable en aplicaciones que involucran el uso de baterías iones de litio. El BMS es una herramienta que permite obtener información del estado de la batería es decir al monitorear la corriente y el voltaje de entrada y salida, la temperatura, la impedancia, la pérdida de capacidad, el sistema de control de carga y descarga, el control de gestión de energía. Además, el BMS es el

encargado de diagnosticar fallas, así como de estimar parámetros como el Estado de Carga (SOC), Estado de Salud (SOH) [5].

### 3.2.4 Terminología usada en el ámbito de las baterías

Para comprender el funcionamiento de una batería, los métodos y herramientas que se utilizan para comprender su estado, es necesario tratar algunos conceptos y sus definiciones.

En el siguiente apartado se define los principales conceptos relacionados a las baterías, así como la información que puede obtenerse de las hojas técnicas de los fabricantes. A continuación, se detallan más relevantes en el ámbito de las baterías.

- a) **Capacidad:** Es la cantidad de corriente que puede suministrar una batería en un tiempo específico. Suele medirse en Amperios – horas [5].
- b) **Ciclo:** Se define como el proceso de descargar una batería que ha sido cargada completamente [5]. Por otra parte, el ciclo de batería se puede establecer como el proceso de descargar una batería completamente cargada y luego volver a cargarla [6].
- c) **Degradación:** Se define como el proceso en el que se disminuye la capacidad de almacenamiento de energía de la batería.
- d) **Electrodo Negativo:** Se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de oxidación.
- e) **Electrodo Positivo:** Se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de reducción.
- f) **Electrolito:** Es una solución acuosa o no acuosa de sales, bases y ácidos que permite el flujo de electrones [5].
- g) **Ánodo:** Tras la reacción química en el ánodo (oxidación) los electrones son liberados y fluyen al cátodo a través de un circuito externo. Los parámetros importantes en la

selección del material del ánodo son eficiencia, alta capacidad específica, conductividad, estabilidad, facilidad de fabricación y bajo costo.

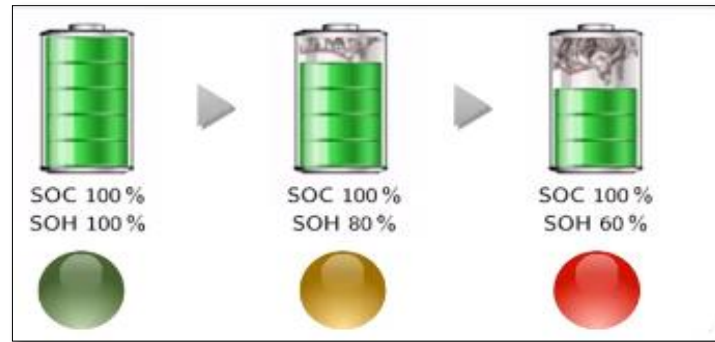
- h) Cátodo:** El cátodo es el electrodo en el que tiene lugar la reducción (absorción de electrones). Durante la descarga el electrodo positivo de la célula es el cátodo. Durante la carga se invierte la situación y el electrodo negativo de la célula es el cátodo. El cátodo se selecciona en base a su tensión y estabilidad química en el tiempo.
- i) Separador:** Un separador es una membrana porosa insertada entre electrodos de carga opuesta. La función clave del separador es mantener separados los electrodos positivo y negativo para evitar cortocircuitos eléctricos y, al mismo tiempo, permitir el transporte rápido de los portadores de carga iónica necesarios para completar el circuito.
- j) Estado de carga (SOC):** El estado de carga (SOC) indica la cantidad de carga en Amperios-horas restante en la batería. y puede determinarse por la tensión de circuito abierto de la batería; Es el estado de la capacidad utilizable en la célula [7].

El SOC este asociado al porcentaje de energía disponible en relación con la energía máxima que es capaz de entregar la batería. Dicho esto, un SOC del 100% indica que la batería está totalmente cargada, mientras que un SOC del 0% indica que la batería ha alcanzado el fin de su descarga o *End-of-Discharge (EoD)* [8].

- k) Estado de Salud (SOH):** El SOH, así como el SOC, es un indicador muy importante en los sistemas de gestión de baterías (BMS), que permiten conocer cuanta degradación ha sufrido una batería permitiendo determinar si la batería puede seguir almacenando y entregando energía para la aplicación [7].

Mientras se use la batería, su capacidad para almacenar energía se degrada. Esto significa que, en cierto momento, la capacidad de la batería se degrada en un cierto porcentaje (con respecto a la capacidad cuando la batería era nueva). En la práctica se considera degradada una batería cuando alcanza entre el 70% y 85% del SOH y en dicho caso se dice que el sistema de almacenamiento alcanza su final de vida o por sus siglas en inglés *Eol (End-of-Life)*.

Como se puede observar en la figura 3.4. Inicialmente se tiene una batería de un SOC al 100% y un SoH de 100% pero conforme se utilice la batería se seguirá degradando, y se tendrá un SOC al 100% y SoH de 80% y si la misma batería se sigue utilizando se tiene un SOC de 100% y un SoH de 60% [9].



**Figura 3.4.** Degradación de la batería respecto al SOC y al SoH [9].

- l) Profundidad de descarga (DoD):** Es una medida de cuánta energía ha sido retirada de una batería, expresada como un porcentaje de la capacidad total. Por ejemplo, si se usa una batería completamente cargada hasta un punto en el que el SOC final es del 80%, se dice que el DoD es igual al 20%.

Si una batería comienza completamente cargada y luego entrega energía hasta que alcanza un SOC del 70% y luego se carga hasta un SOC del 80%, el DoD será la diferencia entre los valores más alto y bajo de SOC; en este caso un DoD del 30% [6]. La profundidad de descarga es el inverso del estado de carga (SoC) [7].

- m) Longitud del SOC:** se refiere a la diferencia total entre el SOC inicial y el SOC final en un ciclo. Cabe recalcar que considera ciclos de carga y descarga.
- n) Promedio del SOC:** Es la media entre los valores (la suma del SOC inicial y el SOC final dividido para 2).
- o) Rango de la oscilación (SR Swing Range):** El SR indica el rango en el que varía la oscilación del SOC (indicando explícitamente los límites superior e inferior del rango). Es importante saber esto porque si la oscilación del SOC es igual al 50%, el efecto de

degradación sería uno si el SR pasa del 50% al 0%, y otro diferente si pasa del 100% al 50% [6].

- p) **Tasa de descarga o carga ( $C_{rate}$ ):** Una tasa C es una medida de la velocidad a la que se descarga una batería con relación a su capacidad máxima. Una corriente de 1C significa que la batería está idealmente cargada o descargada en una hora, C/2 en dos horas y 2C en una media hora [7].
  
- q) **Proceso de Carga:** Se define como el proceso inverso donde la reacción de oxidación ocurre en el electrodo positivo y la reacción de reducción ocurre en el electrodo negativo.
  
- r) **Proceso de Descarga:** Se define como el flujo de electrones desde el ánodo (reacción de oxidación) hasta el cátodo (reacción de reducción) a través de una carga externa.
  
- s) **Vida útil Remanente:** Se define como la capacidad máxima de energía remanente en la batería.
  
- t) **Voltaje Nominal:** Se define como el voltaje de operación del dispositivo o instrumento.
  
- u) **Voltaje de Corte de descarga:** Se define como el voltaje mínimo al cual que puede llegar la batería durante el proceso de descarga. Se utiliza como medida de protección para evitar daños irreversibles en la batería [5].

### 3.2.5 Batería de Ion Litio

En el libro Lithium-ion Batteries, de Yoshio Masaki hace un breve repaso de los antecedentes a las baterías de ion de litio. La primera batería de ion de litio no recargable fue desarrollada por G.N. Lewis a principios de los años 70. Este diseño utilizaba anteriormente sulfuro de titanio (IV) y litio como cátodo y ánodo. Unos años después se empezaron a hacer intentos serios por desarrollar una batería de litio recargable.

Uno de los principales problemas a los que se enfrentó la comunidad científica en aquella época se debía a la generación de dendritas en el ánodo metálico, las cuales producían partículas que se incrustaban en el separador y esto provocaba un corto circuito al entrar en contacto con el cátodo. Sin embargo, en 1979, Goodenough y Mizushima desarrollaron una batería que utilizaba óxido de litio cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ) como material para el cátodo [10]

Por otra parte, las baterías de Ion litio en la actualidad son las más utilizadas para gran cantidad de aplicaciones, tanto para equipos electrónicos (móviles, ordenadores etc.) como para vehículos eléctricos. Aunque como se verá más adelante, hablar de baterías de Ion litio es hablar de diversos tipos diferentes de baterías, como factor común entre ellas se encuentra su elevada densidad energética y tiende a ser nula autodescarga, por otra parte, por ser uno de los tipos más estudiados, su coste es cada vez menor, al igual que su tamaño y peso, lo que le hace que sean idóneas para su uso en los diferentes usos que se le vaya a dar [11], a continuación se muestra en la tabla 3.2 las ventajas y desventajas de las baterías de ion litio.

**Tabla 3.3.** Ventajas y desventajas de las baterías de Ion litio [12].

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Alta energía específica debido a su alto voltaje por celda, 3.6V	Cuando se cargan a alto voltaje se degradan las celdas
Alta densidad energética	A temperaturas bajo 0°C se cargan lentamente
Recarga rápida	Precio más elevado que las baterías de níquel
Soporta altas cargas, por tanto, es posible utilizarlas en coches eléctricos.	Necesitan limitaciones del voltaje y corriente para evitar que ardan.
Ciclos de descarga largos	Son más inestables, y por ende necesitan un controlador de la tensión y la temperatura de las celdas.
Buena eficiencia	Soportan un número limitado de cargas
Muy poca autodescarga	Durabilidad de la batería de dos a tres años a partir de la fecha de fabricación.

### 3.2.6 Funcionamiento de la batería de ion litio

La estructura básica de las baterías es común para todas ellas, se diferencian unas de otras en función de los materiales que componen las distintas partes de esta. Una batería es el

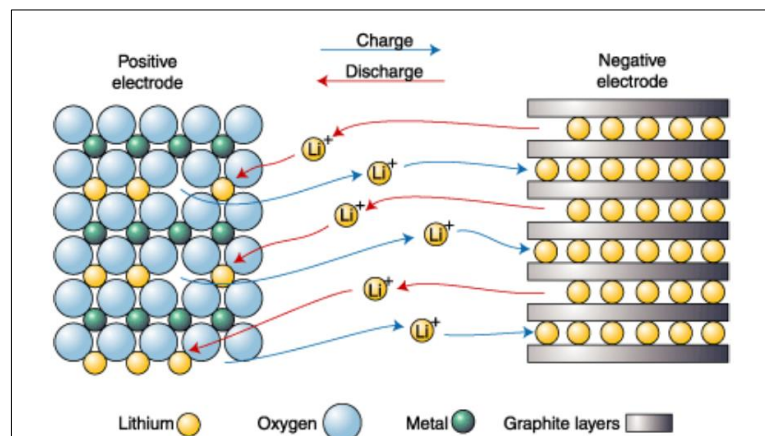
conjunto de una o varias celdas dentro de las cuales tiene una reacción química que provoca la generación de electricidad en la misma. Está formado por dos electrodos, uno positivo (cátodo).

Para las baterías de ion litio el procesó que tiene lugar en el interior de esta es el siguiente. Durante la descarga, la oxidación que se produce en el ánodo provoca el movimiento de iones de litio a través del electrolito hacia el cátodo. Para mantener el equilibrio en la carga del ánodo, se liberan electrones, los cuales se dirigen al cátodo a través de un conductor colocado entre ambos electrodos.

Debido al movimiento de estos electrones por el conductor se produce corriente que es aprovechada, ya sea para alimentar a un motor eléctrico, cargar un dispositivo, etc. Dado que esta reacción redox es reversible, si el conductor que conecta ambos electrodos se aplica una corriente, se fuerza la reacción en el sentido contrario, regresando los iones de litio al ánodo, cargando la batería como se puede observar en la figura 3.5.

Una vez conocida la reacción producida, es de gran importancia definir los compuestos que conforman la batería, pues de ellos dependen características muy importantes de la misma como son la capacidad, el peso o el coste.

En primer lugar, la elección del litio como componente base se debe a que es el elemento con mayor capacidad para ceder electrones durante una reacción redox, lo que se traduce en un potencial de celda muy alto. Además, debido a que es uno de los elementos más ligeros y de menor radio atómico existentes, facilita la gran relación potencia - peso y la alta capacidad volumétrica que caracteriza a estas baterías [11].



**Figura 3.5.** Proceso de carga/descarga y estructura de una batería de litio [11].

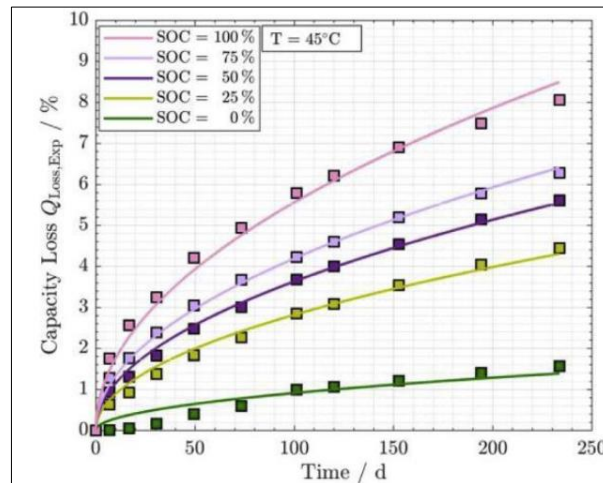
### 3.2.7 Proceso de envejecimiento

El envejecimiento tiene su raíz principalmente en la degradación de los componentes de la batería, resultando en una disminución de la capacidad o la potencia de esta. La identificación de los distintos mecanismos de degradación es uno de los campos más críticos no solo por su importancia, sino por su dificultad.

Para la ejecución de este trabajo se debe tener muy en cuenta los diversos factores que influyen en la degradación durante la vida de la batería, ya sea durante el ciclado o en reposo. Dentro de este grupo constan la variación del SOC, la profundidad de descarga.

Otro factor influyente en el envejecimiento es el SOC, el cual va ligado a la tensión de la batería así, para valores altos de SOC, se obtiene un potencial mayor en el cátodo y un potencial menor en el ánodo. Este potencial del cátodo provoca la oxidación del electrolito y la consecuente descomposición del electrodo.

Por otra parte, se destaca que, ante el SOC muy bajos, se produce corrosión del ánodo y la desestructuración del cátodo, que afecta notablemente al SOH. A partir de esta información se puede concluir que la degradación de la batería aumenta con el SOC, como se observa en la figura 3.6 [11].



**Figura 3.6.** Dependencia del envejecimiento con el SOC [11].

Por último, la corriente con la cual la batería se carga y descarga influyen en el envejecimiento por varias razones. Por un lado, cuanto mayor sea el valor de la corriente, más calor se generará en la batería por el paso de dicha corriente. Se puede decir que cuanto más agresivas sean las condiciones de la carga / descarga, mayor será el desgaste de la batería.

Debido a lo mencionado anterior mente es necesario encontrar un equilibrio en la corriente empleada para poder minimizar la duración de la carga sin deteriorar en exceso la batería [11].

### **3.2.8 Modelos de degradación de baterías de Ion litio**

En este apartado se centra los diferentes modelos de degradación de las baterías de Ion Litio. Un modelo de una batería es un modelo matemático que describen de forma analítica el comportamiento de un sistema real, en este caso la batería de iones de litio.

Todos los modelos están asociados con un cierto grado de precisión, lo que determinará su éxito o fracaso en dicho modelamiento, además su precisión de su aplicación de un sistema real bajo ciertas condiciones depende de su veracidad con las que se construye el modelo y los valores de las variables que se utilizan en él.

De acuerdo con el sistema real a modelar, se pueden obtener modelos simples o complejos. Esta la complejidad depende del número de parámetros incluidos en el modelo y características de los sistemas reales.

La literatura científica actual contiene multitud de procesos y modelos diferentes para las celdas de Ion Litio. Los modelos de batería se pueden clasificar en: modelos empíricos, modelos de ingeniería electroquímicos, modelos físicos, modelos abstractos, modelos eléctricos y estocásticos. Estos modelos de baterías incluyen diferentes niveles de detalles y difieren en términos de complejidad, costo computacional y confiabilidad. Se puede elegir en función de las necesidades de cada aplicación específica.

#### **3.2.8.1 Modelos Empíricos**

El modelo empírico se enfoca en describir el comportamiento de la batería durante ciclos de descarga, así como su ciclo de vida. La base para la forma del modelo ha sido vinculada a los procesos internos de la batería y validado utilizando datos experimentales [13]

Esta propuesta consta de una metodología que utiliza información con respecto a la cantidad de ciclos operativos (regulares), los valores del estado de carga (SOC) y el rango del Intervalo (SR). Utilizando los datos proporcionados por el fabricante.

El método se caracteriza por utilizar la eficiencia de Coulomb. A través de los datasheet de las baterías de Ion litio brindan información sobre la vida útil de las baterías cuando se usan

ente el 100% y 0% respecto al SOC, a partir de esa información es posible estimar un valor para la eficiencia de Coulomb.

La metodología propuesta se utiliza los conceptos de oscilación del SOC, rango de oscilación promedio y eficiencia de Coulomb para modelar la degradación de una manera sencilla mediante técnicas de interpolación, utilizando simulaciones deterministas y de Monte Carlo para obtener la degradación de la capacidad en función del número de ciclo [6].

La factibilidad de utilizar este método es muy eficaz y sencillo así lo resalta [13]. Lo cual dice que los resultados de la predicción utilizando el método empírico han sido realizados de manera satisfactoria. La veracidad del modelo mejorara cuando haya más información teórica intensiva, así como investigación experimental de la batería del comportamiento.

### **3.2.8.2 Modelo Electroquímico**

Son modelos que se basan en las características constructivas y los fenómenos electroquímicos que se producen en el interior de la celda de la batería. Son capaces de reproducir de forma muy exacta el comportamiento de la celda estudiada, sin embargo, estos modelos son muy complejos ya que necesitan ecuaciones diferenciales no lineales para producir el comportamiento de la celda.

Este método es muy complejo por lo cual se hace difícil que sean de implementar ya que requiere una alta carga computacional, lo que concierne a largos periodos de cálculo en la simulación, y esto dificulta su uso y se restringe a actividades muy concretas [14].

El modelo electroquímico normalmente termina como un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales parciales que deben ser resueltos en el tiempo para todas las dimensiones espaciales necesarios. La modelación electroquímica no solo es capaz de predecir la tensión y corriente de la celda, sino también la distribución local de concentración, el potencial, la corriente y la temperatura en el interior de la célula a escala microscópica sería extremadamente difícil obtener por cualquier otra técnica, porque los modelos electroquímicos de las baterías tienden a ser relativamente complejos, normalmente tiene muchos parámetros que debe determinarse [7].

Los procesos de modelado químicos son precisos, ya que simulan a muy pequeña escala los fenómenos que tiene lugar en el interior de la batería. Por contraposición, pero tal precisión implica que estén basados en cálculos muy complejos. La mayoría consisten en seis ecuaciones

diferenciales no lineales, cuya simulación lleva horas o hasta días, lo cual es inviable para vehículos eléctricos ya que los sistemas de control normalmente necesitan datos en tiempo real [11].

### **3.2.8.3 Modelos Físicos**

Los modelos físicos, se utiliza como herramienta para optimizar los parámetros físicos de una batería, tiene una gran utilidad para los diseñadores de baterías con gran precisión. Sin embargo, para determinar los resultados de predicción, los modelos físicos funcionan lentamente. Las configuraciones de dicho modelo son complicadas que requiere conocimientos analíticos limitados para los diseñadores de sistemas.

### **3.2.8.4 Modelos Abstractos**

Los modelos abstractos intentan proporcionar una representación equivalente de una batería en lugar de modelar el comportamiento de descarga, ya sea describiendo los procesos electroquímicos en la celda o mediante una aproximación empírica. Los modelos abstractos emplean tablas de búsqueda que requieren un esfuerzo considerable para su configuración, tienen una utilidad limitada para la exploración espacial de diseño automatizado; y carecen de expresiones analíticas para muchas variables de interés.

### **3.2.8.5 Otros modelos**

También se pueden clasificar en modelos analíticos, basados en circuitos eléctricos, técnicas estocásticas y electroquímicas. Los modelos analíticos utilizan expresiones algebraicas para calcular la capacidad residual de la batería a través de la descarga de corriente y las propiedades físicas de la batería. Sin embargo, es necesario configurar más de quince parámetros físicos para estimar la vida útil de la batería con una corriente de carga constante [3].

Los modelos anteriores se comparan en función de su precisión, complejidad computacional y esfuerzo de configuración como se muestra en la siguiente tabla 3.3.

**Tabla 3.4.** Comparación de los diferentes modelados con respecto a las baterías de Ion Litio.

<b>Método de modelado</b>	<b>Precisión</b>	<b>Complejidad computacional</b>	<b>Esfuerzo de configuración</b>
<b>Modelos físicos</b>	Más preciso	Muy compleja y lenta para producir resultados	Más difícil
<b>Modelos empíricos</b>	Precisión aceptable	Produce predicciones rápidamente	Más fácil
<b>Modelos abstractos</b>	Precisión aceptable	Requiere mucho esfuerzo	Difícil
<b>Modelos electroquímicos</b>	Más preciso	Muy compleja y lenta para producir resultados	Más difícil

A la hora de elegir el tipo de modelo será más eficaz para un sistema concreto se han de valorarse una serie de aspectos. Lo primero que hemos de tener en cuenta son los conocimientos y herramientas que se poseen y así analizar si podemos valorar todos los puntos de vista nombrados, o por el contrario será conveniente descartar alguno de ellos.

Hay que destacar que en que este trabajo de investigación el modelo a elegir será el modelo empírico ya que se basa en el análisis de observaciones (datos experimentales), y este modelado cumple con las expectativas que se necesita, así mismo este método se componen de datos medidos y están orientados para entender el estado de carga y lo más importante a destacar de este modelo que en la precisión de resultados son aceptable, produce predicciones rápidamente y es más fácil.

### **3.2.9 Modelos de degradación utilizado**

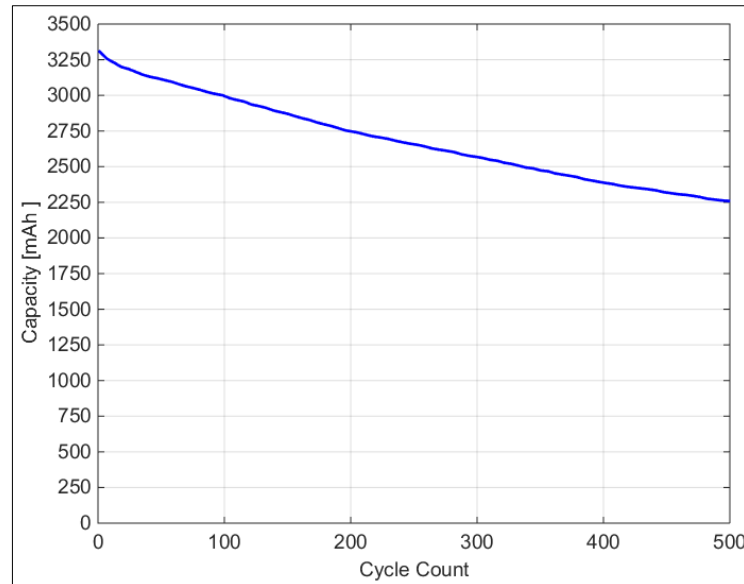
A continuación, se muestra el modelo de degradación utilizado em el presente proyecto de investigación se basa en la profundidad de descarga que se utiliza para caracterizar la degradación de las baterías de iones de litio. La literatura considerada se titula “Modelling the Degradation Process of Lithium-Ion Batteries When Operating at Erratic State-of-Charge Swing Ranges” [6], y su objetivo principal es cuantificar el número de ciclos en los que se considera que la batería se degrada, en función del porcentaje de capacidad perdida, a través de la Profundidad de descarga y los SOC inicial y final.

Dicho modelo se caracteriza por tres etapas principales, primero una expresión general que describe la capacidad y su evolución cíclica, luego la determinación de la eficiencia de Coulomb y finalmente la corrección de esta última mediante la determinación de un factor escala. Para la

evaluación del modelo matemático se va a centrar en un tipo particular de modelo de degradación basado en el concepto llamado eficiencia de Coulomb denotado con la letra griega  $\eta$ .

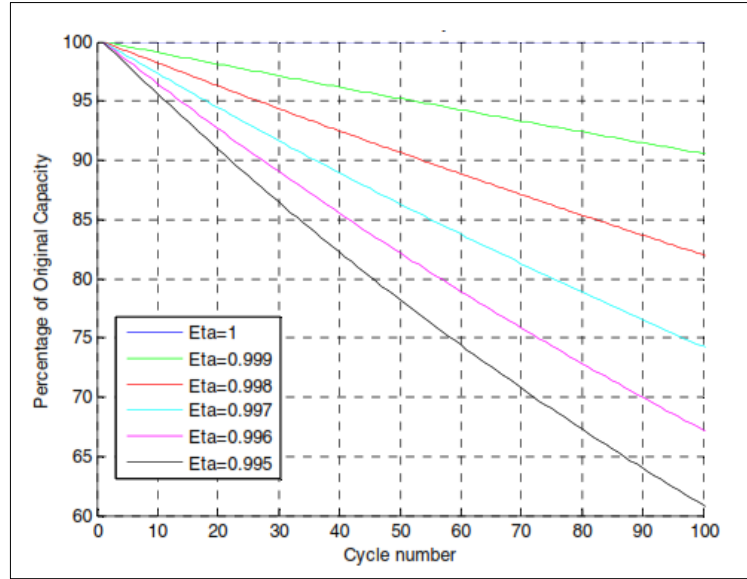
Se define como la fracción de la capacidad de carga previa que está disponible durante el siguiente ciclo de descarga (además, se puede definir una eficiencia para la carga y otra diferente para la descarga). Esta eficiencia se ve afectada por la profundidad de descarga, la corriente extraída, y la temperatura a la que se colocan y operan las baterías [6].

Las hojas de datos proporcionan información sobre la tendencia de la degradación de la capacidad después de una cierta cantidad de ciclos, como se muestra en la Figura 3.7, se reconstruye a partir de la hoja de datos de la batería de iones de litio Panasonic NCR18650B.



**Figura 3.7.** Vida útil de Panasonic NCR18650B [6].

Aunque la degradación es causada por múltiples efectos, la eficiencia de Coulomb se puede utilizar para simplificar y explicar todo el fenómeno de degradación con un solo término. La figura 3.7, muestra un ejemplo de la degradación de la capacidad de la batería para diferentes valores de eficiencia Coulomb, después de 100 ciclos de uso.



**Figura 3.8.** Ejemplo de la eficiencia de Coulomb durante el ciclado [6].

Básicamente, cuanto mayor sea el valor de  $\eta$ , menor será la degradación por ciclo que tendrá una batería. Dado que la mayoría de las baterías de iones de litio tienen una vida útil de varios cientos de ciclos, es imperativo trabajar con varios puntos decimales para obtener el valor más apropiado de la eficiencia de Coulomb [6].

Este método propuesto, los ciclos se caracterizan por utilizar su eficiencia Coulomb asociada a  $E_{\eta}$ . En este sentido, la capacidad de almacenamiento se degrada a través de cada ciclo  $k$ , utilizando (1).

La expresión que relaciona la capacidad de un ciclo sucesivo con el anterior a través de la eficiencia de Coulomb es la siguiente:

$$E_{k+1} = \eta_k E_k \quad (1)$$

Donde:

$E_{k+1}$ : Energía siguiente (mAh-Ah)

$\eta_k$ :  $E_{\eta}$  (%)

$E_k$  : Energía anterior (mAh-Ah)

Esta propuesta incluye una metodología que utiliza información de la batería, con respecto a la cantidad de ciclos operativos (regulares) y los valores de SOC swing y SR. Utilizando datos

proporcionados por el fabricante, es posible calcular el valor de Eta. En este caso, 11 SR (100-0%, 100-25%, 75-0%, 100-50%, 75-25%, 50-0%, 100-75%, 75-50%, 62.5-37.5%, 50-25% y 250%) y se conoce el número total de ciclos para cada uno de estos SR. Se observa en la Figura 3.7, y la Figura 3.8.

Se puede calcular un valor para la eficiencia de Coulomb si se considera una tasa de desintegración constante. Al usar la cantidad conocida de ciclos totales, y suponiendo que un ciclo se completa después de descargar la batería a la corriente nominal entre los valores definidos de SR, es decir usa información de la batería, tales como la cantidad de ciclos operativos (obtenidos por el fabricante) y los valores del SOC swing y Swing Range.

Por lo general quedan definidos por ciclos de descarga con la batería totalmente cargada ( $SOC_{inicial} = 100\%$ ) hasta dejarla sin energía ( $SOC_{final} = 0\%$ ). También se necesita contar con el porcentaje de degradación de la batería (obtenida por el fabricante).

La siguiente ecuación simplifica el cálculo de la eficiencia de Coulomb, a través de (2).

$$\eta_k = (\% \text{ Degradación})^{1 / \# \text{ cycles}} \quad (2)$$

En este caso, el porcentaje de degradación debe definirse como un valor entre 0 y 1, ya que sería igual al porcentaje de la capacidad nominal donde el usuario o fabricante define el límite para ser considerado totalmente degradado.

Por ejemplo, si una batería está clasificada para funcionar durante 6000 ciclos, con una capacidad nominal final del 80% (de su valor original), el valor de la eficiencia de Coulomb sería 0,99996281; pero si se considera este porcentaje como el 75% (de su valor original), el valor de Eta sería 0,99995205.

Este procedimiento se realiza para los once casos que se muestra en la tabla 3.4, por lo que cada uno tiene asociado un valor de Eta. Aunque se tiene una buena cantidad de casos operativos, esto no cubre todas las posibles combinaciones de SR. Por esta razón, usando el Modelo Basado en Similitud (SBM [15]) es posible interpolar y obtener un valor apropiado de la eficiencia Coulomb.

Usando la oscilación conocida del SOC y el valor medio de SR, podemos crear un diagrama de dispersión como el que se muestra en la Figura. 3.9, donde los asteriscos representan las

condiciones conocidas y el círculo negro representa una condición operativa particular. La eficiencia Coulomb equivalente se determinará como se describe a continuación.

En el caso que el SOC Range no esté representado en alguno de las 11 opciones de la tabla 3.9, se debe recurrir al diagrama de dispersión que presenta una forma triangular, se usa SBM (Similarity Based Model) y la metodología de los 3 vecinos cercanos. Ponderando la inversa de las distancias a las condiciones conocidas (3 de ellas), es posible determinar el valor de una eficiencia Coulomb aproximada para todas las posibles condiciones de operación.

### 3.2.9.1 SBM (Modelos basado en similitud) y los 3 vecinos cercanos (K-nearest neighbors)

El SBM consta de identificar similitudes y relaciones entre las variables de un conjunto de observaciones en este caso sería los 3 vecinos más cercanos ya que esta metodología utilizada en la investigación está basada en la regla del vecino más cercano, que consiste en estimar el valor de un dato desconocido a partir de las características del dato más próximo, según el SBM.

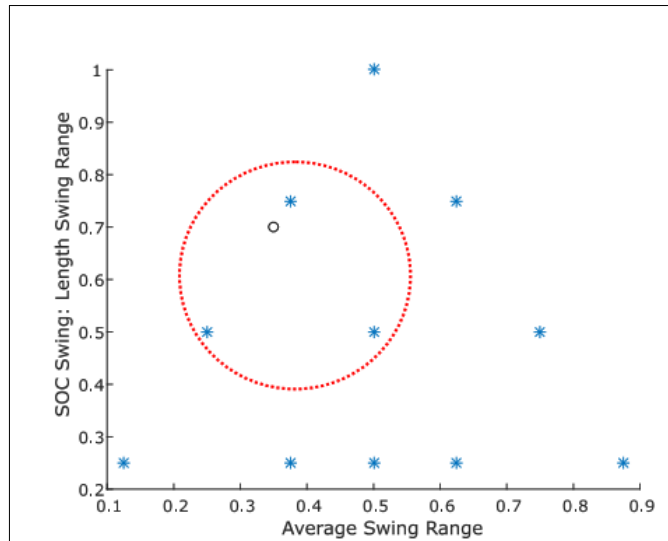
A continuación, se muestra los siguientes métodos para encontrar los K-Vecinos más cercanos los cuales son [15]:

- **Distancia Euclidiana:** Es la distancia en línea recta o la trayectoria más corta posible entre dos puntos.
- **Distancia Chebyshev:** Es una métrica definida en un espacio vectorial donde la distancia entre dos vectores es el mayor de sus diferencias a lo largo de cualquier dimensión de coordenadas.
- **Distancia Manhattan:** La función de la distancia Manhattan calcula la distancia que se puede recorrer para llegar de un punto de datos a la otra si un camino en forma de rejilla es seguido. La distancia Manhattan entre dos elementos es la suma de las diferencias de sus correspondientes componentes.
- **Distancia Kullback - Leibler:** Es una medida no simétrica de la similitud o diferencia entre dos funciones de distribución de probabilidad [16].

Para encontrar los 3 vecinos más cercanos según el autor del artículo [6], utiliza el método de la inversa de las distancias que consiste en asignar el mayor peso a las muestras cercanas y menor peso a las muestras alejadas, y usa la metodología del SBM, ya que su precisión resulta ser muy bueno y está validado por el autor del artículo.

Los datasheets para las baterías de iones de litio brindan información sobre la vida útil de las baterías cuando se usan entre el 100% y el 0% de SOC, como se muestra en la Figura 3.7. A partir de esta información, es posible estimar un valor para la eficiencia de Coulomb usando (2).

No siempre es posible tener toda la información de SOC swing y SR. Por esta razón, se propone un método de extrapolación de los resultados anteriores para su uso con otras baterías de iones de litio. Suponiendo que las baterías de iones de litio tienen comportamientos similares, se propone que la eficiencia de Coulomb se puede escalar utilizando el caso conocido descrito anteriormente donde se conocen los 11 valores de SR [6].



**Figura 3.9.** K-Diagrama de dispersión del vecino más cercano [6].

La figura 3.9, nos muestra el caso de un estado de carga inicial de 70% hasta su total descarga, de esta manera el SOC Range es 0.7 y su promedio entre ambos estados de cargas es 0.35. Encerrados en una circunferencia roja son señalados los 3 vecinos cercanos, cada uno este asociado a un factor de escala. Este factor de escala requerido queda determinado por la ponderación por la ponderación de los factores de escala de cada uno de los 3 vecinos cercanos, mostrados en la tabla 3.4. con el inverso de las distancias.

La Tabla 3.4, muestra los factores de escalada correspondientes que se pueden utilizar para caracterizar la eficiencia de Coulomb cuando las baterías funcionan con diferentes SR. Además, considera diferentes porcentajes de degradación ya que pueden diferir entre fabricantes.

**Tabla 3.5.** Factores de escalada para tres casos de degradación [6].

<b>Porcentaje de degradación</b>			
<b>SR</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.85</b>
<b>100-0</b>	1.000000	1.00000000	1.00000000
<b>100-25</b>	1.000003	1.00000266	1.00000193
<b>75-0</b>	1.000024	1.00001860	1.00001354
<b>100-50</b>	0.999989	0.99999203	0.99999420
<b>75-25</b>	1.000019	1.00001521	1.00001108
<b>50-0</b>	1.000037	1.00002874	1.00002093
<b>100-75</b>	1.000027	1.00002146	1.00001563
<b>75-50</b>	1.000011	1.00000881	1.00000642
<b>62.5-37.5</b>	1.000008	1.00000620	1.00000451
<b>50-25</b>	1.000043	1.00003347	1.00002438
<b>25-0</b>	1.000054	1.00004184	1.00003047

Por ejemplo, consideremos dos tipos de baterías de iones de litio comerciales. El primer caso es el Samsung ICR18650-22P. Utilizando la información proporcionada por el fabricante es posible calcular la eficiencia Coulomb. En este caso, tenemos un valor de  $\eta$  de 0.9992869 después de 500 ciclos ya que luego en ese punto la capacidad de la batería se ha degradado al 70% de la capacidad nominal, lo que significa que hay una pérdida del 30% de la capacidad original [6].

### **3.2.10 Aplicaciones de las baterías de Ion Litio**

Las baterías de iones de litio presentan características superiores comparadas con otras. Es por ello por lo que su uso se ha incrementado considerablemente en los últimos años. Por ejemplo, el uso de este tipo de baterías ha sido significativo en el mercado de dispositivos electrónicos, específicamente en celulares, tablets y computadoras portátiles. Actualmente se tiene que el 31% de la población mundial utiliza teléfonos inteligentes, por lo que representa un mercado de relevancia para las baterías de iones de litio.

Al pasar de los años el mercado principal de las baterías de iones de litio han sido los dispositivos electrónicos, pero esta situación se encuentra en proceso de cambio al utilizarse

cada vez más las baterías de iones de litio en dispositivos para el cuidado de la salud, vehículos eléctricos, equipos electrónicos.

Debido a su reducido tamaño, peso, alta densidad de energía y prolongado tiempo de vida, las baterías de iones de litio han sido seleccionadas como principales candidatas para los dispositivos para el cuidado de la salud, mercado emergente que mueve millones de dólares anualmente. Los marcapasos, transmisores de radio implantables, estimuladores gástricos, biosensores portátiles, herramientas quirúrgicas, desfibriladores, monitores son ejemplos de algunos dispositivos médicos que utilizan este tipo de baterías [5].

### **3.2.11 Los vehículos eléctricos**

La historia del automóvil comenzó en 1825. Coche de vapor. Poco después, en 1839, se exhibió el primer automóvil en Escocia. Con energía de baterías no recargables. En 1886, Karl Friedrich Benz (Karl Friedrich Benz) apareció en una ciudad alemana el primer automóvil con motor de combustión interna de Mannheim. En solo 60 años, tres diferentes tecnologías que conviven desde hace varios años.

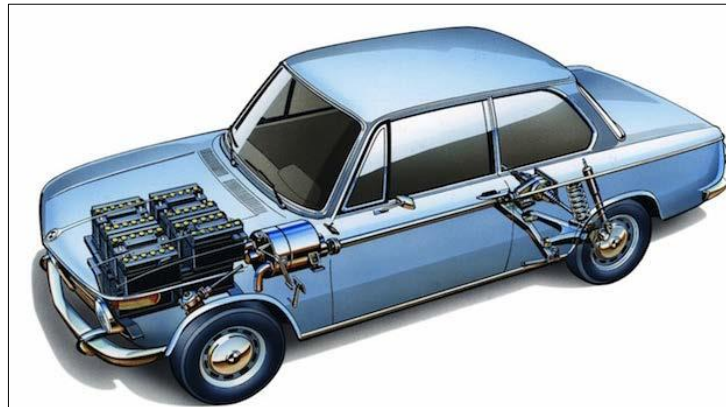
Debido a la ineficiencia y los altos costos de puesta en marcha, los vehículos a vapor se están eliminando rápidamente para dar paso a los vehículos eléctricos y de motor de combustión. Las dos tecnologías coexisten en una fase más amplia.

El vehículo eléctrico se perfecciona como ganador de la batalla de la automoción, al presentar en Londres en 1897 un vehículo eléctrico con baterías de plomo-ácido recargables y una autonomía de 80km, y establecer en 1899 el récord de velocidad en su época al superar la barrera de 100km/h.

Con la llegada del siglo XX, las condiciones comenzaron a ser más favorables al vehículo de combustión interna debido al bajo precio del petróleo y al poseer una reposición de combustible más rápido que los procesos de carga de los vehículos eléctricos.

La invención del motor de arranque en 1911 y la paulatina reducción del coste de fabricación de los vehículos con motor de combustión interna supusieron el declive de los vehículos eléctricos, además, desde 1908, Ford ha vendido autos que superan a los autos eléctricos a gran escala. Con estos y otros avances, los vehículos eléctricos perdieron mercado y su uso se redujo a áreas muy específicas.

En la década de 1970, se impulsó de manera enfática al vehículo eléctrico debido a la crisis del precio del petróleo y gracias a los problemas medioambientales. Algunos fabricantes realizaron prototipos no comerciales de utilidad comercial más que real [14].



**Figura 3.10.** Prototipo de vehículo eléctrico presentado por BMW en 1969 [14].

La llegada del tercer milenio, el descubrimiento de nuevos materiales y el impacto ambiental de los contaminantes emitidos por los vehículos de propulsión interna ha impulsado la investigación por parte de los principales fabricantes del sector de la automoción. A principios de 2010, Nissan comenzó a vender el Nissan Leaf de primera generación, seguido de otros fabricantes como BMW y Renault.

El primer modelo comercial tiene unos 100 kilómetros de autonomía, suficiente entorno urbano, pero los desplazamientos entre ambas ciudades son escasos. Las investigaciones actuales se centran en ampliar la autonomía del vehículo, lo que permite que estos primeros modelos aumenten la autonomía hasta los 400 kilómetros.

En el ámbito de electromovilidad es fundamental considerar que una batería se encuentra degradada y en condiciones para ser removida o reutilizada en otra aplicación cuando su SoH se encuentra entre 70-85 % por ejemplo, Nissan recomienda realizar el cambio de batería al 70 % de capacidad [14].

### **3.2.11.1 Aplicación de las baterías de ion en vehículos eléctricos**

Las aplicaciones donde las baterías de iones de litio juegan un papel relevante son los vehículos eléctricos. Esta industria ha tenido un incremento significativo en los últimos años gracias a las diferentes políticas implementadas por los gobiernos para disminuir la emisión de gases [5].

Un vehículo eléctrico actualmente es un móvil impulsado por uno o más motores eléctricos y con un sistema de electrónica de potencia aprovecha la capacidad de almacenamiento de energía en una batería de ion-litio.

Su apariencia visual es similar a los automóviles con motor de combustión interna, tienen chasis, carrocería, motores eléctricos y transmisiones, baterías de ion-litio, inversores y electrónica. Además del equipo auxiliar, también está la fuente de alimentación.

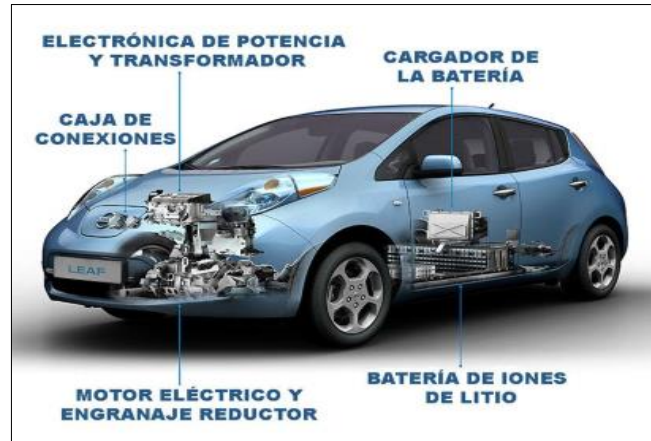
Actualmente en el mercado son ofertados varios modelos de sedanes, hatchbacks, camionetas y más; tienen autonomía Rangos de 130 a más de 300 km, dependiendo de la capacidad medida en amperio-hora [Ah] o energía [kWh] y uso específico para cada usuario. Muchos modelos traen incorporados las modalidades de carga rápida y lenta o en corriente tipo CC (corriente continua) y CA (corriente alterna), así como también una serie de tipos de cargadores disponibles según el lugar de fabricación y destino de venta [8].



**Figura 3.11.** Modelos de vehículos 100% eléctricos Hyundai Ioniq-BMW i3-Tesla Model S [8].

En la siguiente figura 3.12, se puede observar las partes principales electromecánicas de un vehículo eléctrico las cuales constan de:

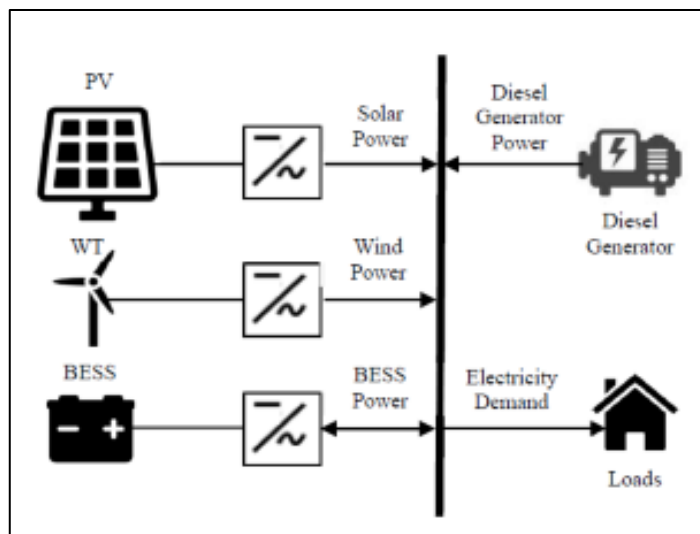
- Electrónica de potencia y transformador.
- Caja de conexiones.
- Motor eléctrico y engranaje reductor.
- Baterías de iones litio.



**Figura 3.12.** Partes Nissan LEAF 1era generación [8].

### 3.2.12 Microrred aislada

Una microrred aislada es un sistema de micro energía y consta de varias fuentes de energía no renovable no convencional (ERNC), un sistema de almacenamiento (Baterías), y generación convencional como generadores de diésel que actúan como generación principal o auxiliar, para alimentar a las cargas locales [17].



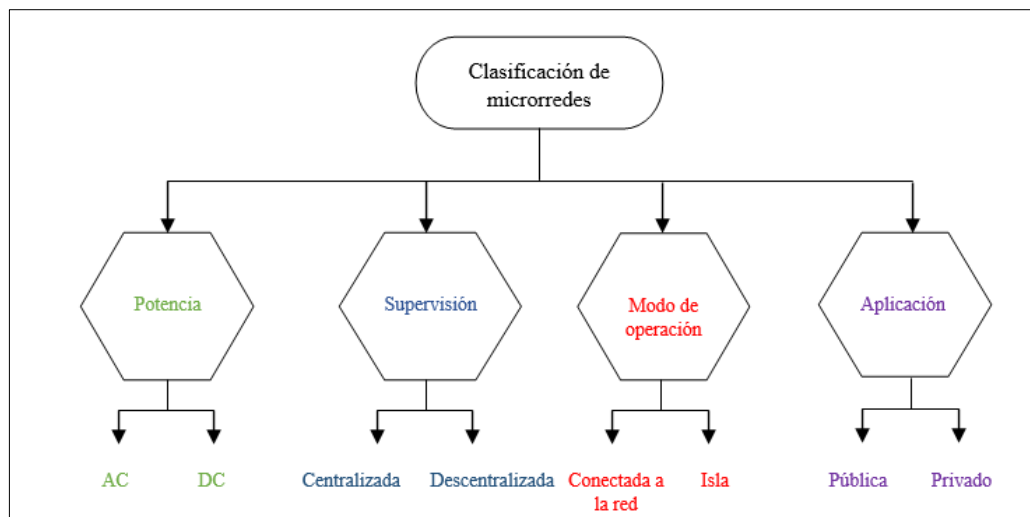
**Figura 3.13.** Diagrama de una Microrred con base en ERNC [18].

#### 3.2.12.1 Características de la microrred

Las microrredes por lo general tienden a ser sistemas de energías sostenibles, en las que la principal fuente de generación es la energía renovable, acompañada de sistemas de generación eficientes y está compuesta de diferentes elementos de generación distribuida y cargas que demandan la energía [17].

Existen diferentes criterios para clasificar una microrred. Se pueden clasificar [17]:

- Tipo de potencia: AC/DC.
- Tipo de supervisión: la microrred puede tener un controlador central, en este caso tiene una supervisión centralizada. O puede tener un controlador local, en este caso tiene una supervisión descentralizada.
- Modo de operación: en isla o con conexión a la red.
- Aplicación: se puede dividir en uso privado (residencial, comercial o industrial) o uso público (municipal, empresa de servicio público o militar).



**Figura 3.14.** Clasificación de las microrredes [17].

### 3.2.12.2 Aplicación de las baterías de ion litio en las microrredes

Hoy en día, las microrredes basadas en fuentes renovables surgen como una solución para el suministro de energía a los pueblos alejados de la red, mejorando la calidad de vida de los habitantes. Las microrredes se pueden definir como sistemas de distribución eléctrica que utilizan recursos energéticos distribuidos, como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento o cargas que pueden controlarse y coordinarse, ya sea mientras están conectados a la red eléctrica principal o funcionan en modo isla.

Las microrredes aisladas son capaces de integrar y coordinar varias fuentes de energía con estrategias de frecuencia de carga adecuadas y la participación de la comunidad local. Para garantizar un consumo energético óptimo se requiere un Sistema de Gestión de Energía (EMS).

El EMS necesita un sistema de almacenamiento de energía por batería (BESS) para garantizar el funcionamiento eficiente, seguro y estable de la microrred [17].

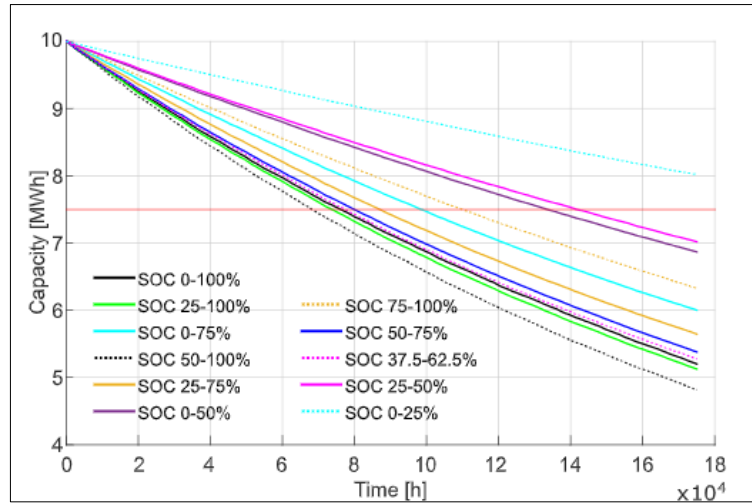
Por otra parte, el sistema de almacenamiento de energía (BESS) basado en iones de litio desempeña un papel importante en la resolución de problemas de suministro de energía en microrredes debido a sus características de rendimiento, como alta potencia, alta eficiencia, baja autodescarga y larga vida útil. Por lo tanto, es fundamental conocer la vida útil de BESS, especialmente entendiendo cómo evoluciona su proceso de degradación a lo largo del tiempo [18].

El (BESS) juega un papel importante considerando su relativa simplicidad en la instalación y mayor capacidad de control. En el contexto de la microrred, BESS podría usarse para compensar las fluctuaciones estocásticas de energía inducidas por las unidades generadoras de energías renovables y también proporcionan autonomía energética. Por tanto, es fundamental saber cómo se degradan los BESS con el tiempo.

### **3.2.13 Restricciones del SOC para extender la vida útil de la batería**

Los datos proporcionados por el autor del artículo [19], sugieren que la vida útil de las baterías puede aumentar significativamente en el modo de operación que se use dentro de un rango de oscilación más pequeño (por ejemplo, 0-25%) en lugar de con toda su capacidad energética (por ejemplo, 0-100%). Por tanto, la degradación asociados a 11 políticas operativas que pretenden limitar el SOC. Para ello, se añade límites inferiores y superiores para restringir el estado de carga en un rango determinado

En este apartado la Figura 3.15, muestra que restringir el SOC al decidir el funcionamiento que se le dé a la batería presenta claros beneficios, ya que la vida útil de la batería se puede aumentar. Por ejemplo, la vida útil de la batería es de 76000 h si el SOC no tiene restricciones, este puede aumentar hasta más de 175 000 h si el SOC está restringido entre 0 y 25 %. Otra característica interesante, que se muestra en la Figura. 3.15, es que es más atractivo limitar los límites superiores en lugar de los inferiores del rango de oscilación.



**Figura 3.15.** Degradación de la capacidad energética para diferentes políticas operativas. La línea roja horizontal indica el 75% de la capacidad de energía nominal [19].

### 3.2.14 Método de Montecarlo

El método de Montecarlo es una técnica de cálculo no determinística, en donde los valores de las variables asociadas a un problema se determinan mediante la generación de números aleatorios. En sistemas que cuentan con muchos estados posibles o problemas en el cual los estados de las variables cambian de acuerdo con las circunstancias puntuales, el poder asociar funciones de probabilidad a dichos estados o variables facilita el análisis e incluso es capaz de reducir los grados de error obtenidos.

De esta manera la generación y evaluación de muchos escenarios diferentes, donde cada estado o variable puede comportarse de manera diferente según su distribución de probabilidad asociada. Aunque en principio el método de Montecarlo surgió para aplicarse a problemas físicos y matemáticos que no podían resolverse analíticamente, es posible utilizar este tipo de técnica en cualquier aplicación que requiera un modelamiento o análisis no determinístico [20].

## **4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

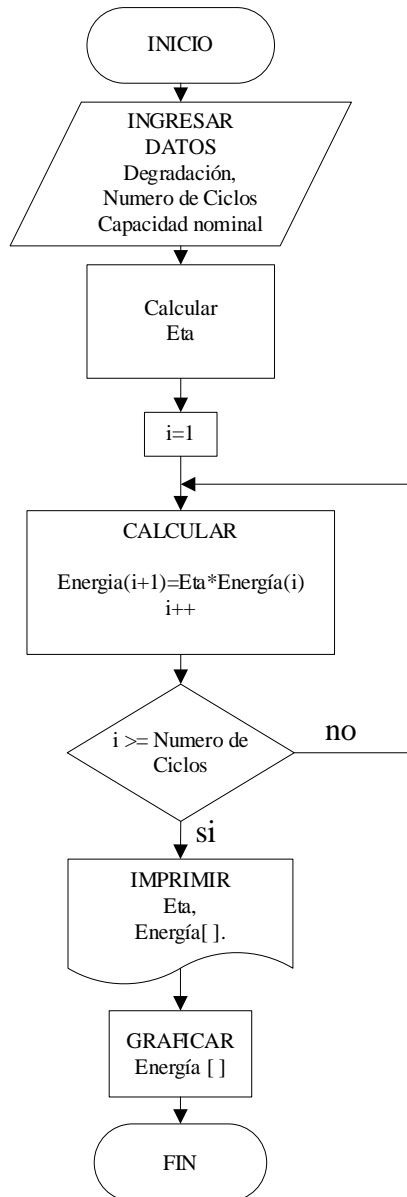
Para realizar el presente proyecto de investigación se requiere aplicar el método de investigación bibliográfica que se basa en la revisión bibliográfica del tema, con indagación, recopilación, organización, crítica e información que permita conocer el estado de arte de modelamiento de baterías de ion litio y así tener un conocimiento inicial. De esta manera se determinó la información teórica relacionado con las baterías de Ion Litio. También se utilizó el método de investigación descriptiva que consiste en describir lo que se realizó con el tema, se establecerá la evaluación de un modelo matemático que permita conocer la degradación de la batería para los casos de estudio como vehículos eléctricos y microrredes.

### **4.2 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DEGRADACIÓN DE UNA BATERÍA DE ION - LITIO**

El diagrama de flujo indica la secuencia de pasos que sigue la programación en el proceso de la obtención de la curva característica de la degradación de la batería durante el transcurso de los ciclos de carga y descarga.

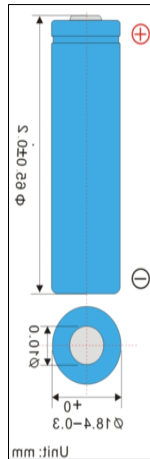
El cual consta como parámetros de entrada, el porcentaje de degradación, número de ciclos y capacidad nominal de la batería; una vez ingresado los datos, se calcula el Eta general de la batería, y mediante un contador, se realiza el cálculo de la Energía, que tiene como condición, se realice el cálculo de la Energía las veces que se indica en el número de ciclos de carga ingresado y se van almacenando en un vector.

Una vez finalizado los cálculos, se muestra el valor de Eta y el vector de Energías y a su vez se muestra la gráfica correspondiente a la degradación de la batería. A continuación, se muestra el diagrama de flujo en la figura 4.1.



**Figura 4.1.** Diagrama de flujo de la metodología para la evaluación de un modelo de degradación de una batería.

Para el método de ejemplo se eligió la siguiente batería LIR 18650 2600mAh que se lo obtuvo de la hoja del fabricante [21], en el cual primero se identifica las características básicas de la batería.



**Figura 4.2.** Dimensiones de la batería LIR18650 [21].

En la tabla 4.1, y 4.2, se debe observar primero la capacidad nominal su porcentaje de degradación y por último su ciclo de vida ya que esos datos son de suma importancia para modelar el sistema en Matlab.

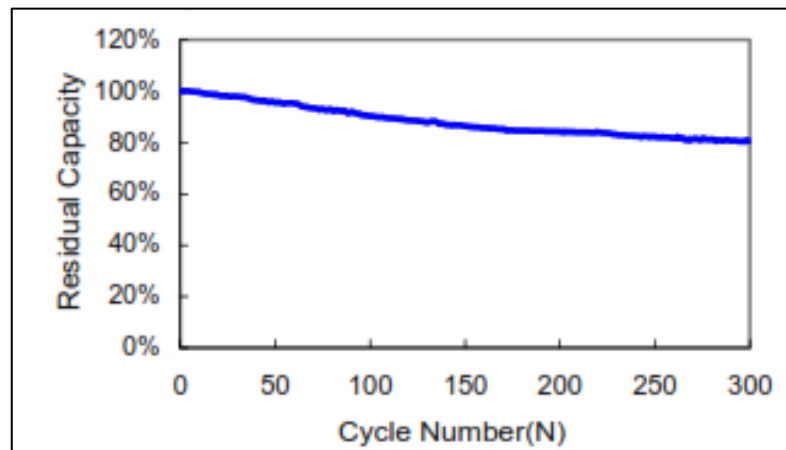
**Tabla 4.1.** Características básicas de la batería LIR18650 [21].

Capacidad (25±5 °C)	Capacidad nominal: 2600 mAh (descarga de 0,52 A, 2,75 V) Capacidad típica: 2550 mAh (descarga de 0,52 A), 2,75 V) Capacidad mínima: 2500 mAh (0,52 A Descarga, 2,75 V)
<b>Tensión nominal</b>	3.7V
<b>Impedancia interna</b>	≤70mΩ
<b>Voltaje de corte de descarga</b>	3.0V
<b>Voltaje máximo de carga</b>	4.20±0.05V
<b>Corriente de carga estándar</b>	0.52A
<b>Corriente de carga rápida</b>	1.3A
<b>Corriente de descarga estándar</b>	0.52A
<b>Corriente de descarga rápida</b>	1.3A
<b>Corriente máxima de descarga de pulso</b>	2.6A
<b>Peso</b>	46.5±1g
<b>máx. Dimensión</b>	Diámetro (Ø): 18,4 mm Altura (Al): 65,2 mm
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	Carga: 0 ~ 45 °C Descarga: -20 ~ 60 °C
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	Durante 1 mes: -5 ~ 35 °C Durante 6 meses: 0 ~ 35 °C

**Tabla 4.2.** Prestaciones eléctricas de la batería LIR18650 [21].

Elementos	Procedimiento de prueba	Requisitos
<b>Tensión nominal</b>	El valor medio de la tensión de trabajo durante todo el proceso de descarga.	3.7V
<b>Rendimiento de descarga</b>	La capacidad de descarga de la celda, medida con 1,3 A hasta 3,0 V dentro de 1 hora después de completar la carga.	=114min
<b>Retención de capacidad</b>	Después de 28 días de almacenamiento a 25±5 °C, después de haber sido completamente cargado y descargado a 0.52A, se carga a 3.0V, la capacidad residual es superior al 80%	Capacidad≥2080mAh
<b>Ciclo de Vida</b>	Después de 299 ciclos al 100 % de DOD. Carga y descarga a 1,3 A, y más 1 día, medida con carga y descarga de 0,52 A, la capacidad de descarga residual es superior al 80 % de la capacidad inicial (el ciclo de vida puede determinarse según las condiciones de carga, descarga, temperatura de funcionamiento y/o almacenamiento). .)	<b>300 ciclos</b> la capacidad residual ≥2050mAh
<b>Almacenamiento</b>	(Dentro de los 3 meses posteriores a la fabricación) Las celdas se cargan con 1,3 A al 40-50 % de capacidad y se almacenan a temperatura ambiente de 25 ± 5, 65 ± 20 % de HR durante 12 °C meses. Después del período de almacenamiento de 12 meses, la celda está completamente cargada y descargada a 3,0 V con 0,52 A.	Tiempo de descarga≥4h

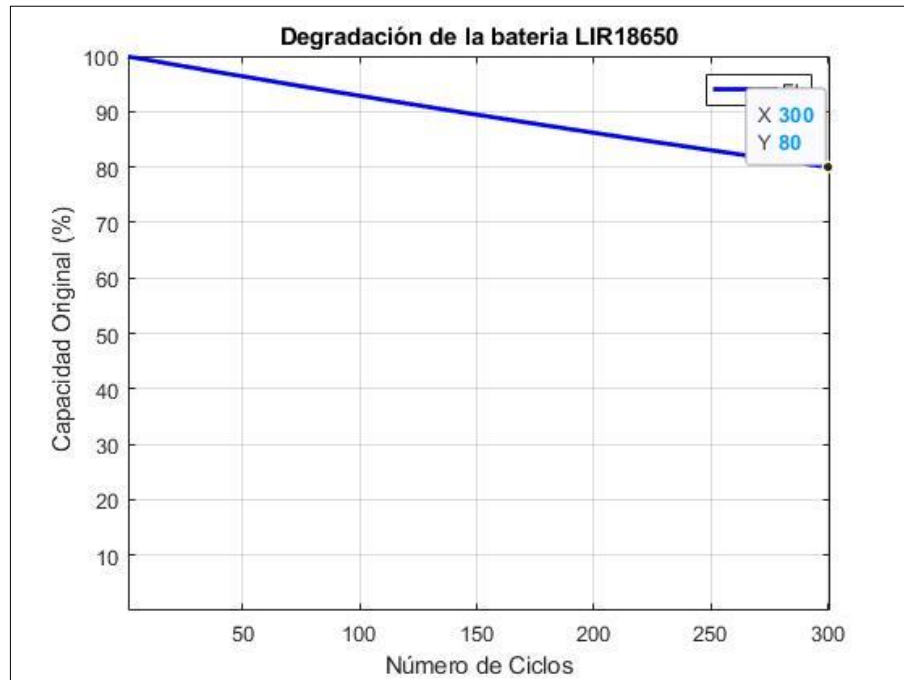
Como se puede observar en la siguiente figura 4.3, son las características del ciclo entregadas por el fabricante, en el eje de la x tenemos el número de ciclos y en el eje de la y tenemos capacidad residual.



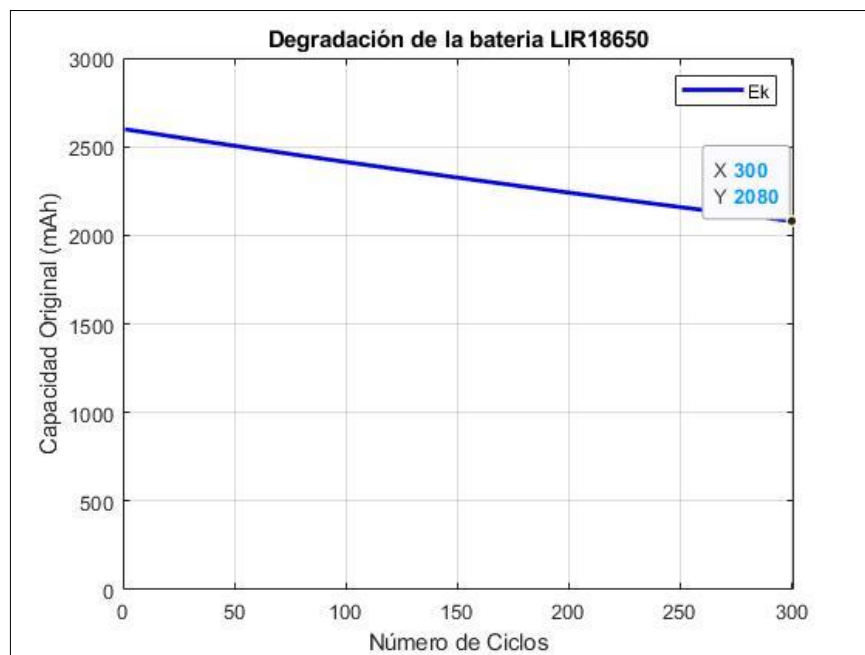
**Figura 4.3.** Características cíclicas de la batería LIR18650 [21].

Una vez identificado la información necesaria se procede a simular en Matlab. Como resultado se obtuvo Eta de 0.999256464721737 usando la ecuación (2), cabe recalcar que para este ejemplo el Eta es un valor fijo. Para obtener la gráfica de la degradación de la batería

LIR18650 se usa la expresión que relaciona la capacidad de un ciclo sucesivo con el anterior a través de la eficiencia de Coulomb (1).



**Figura 4.4.** Degradación de la batería LIR18650 representado en porcentaje de la capacidad original



**Figura 4.5.** Degradación de la batería LIR18650 representado en mAh de su capacidad original.

Como se puede observar en la figura 4.4, se representa en porcentaje lo cual nos indica que su capacidad original es de 100% pero a medida que se carga y descarga la batería tendrá un 80% de la capacidad original y por ende la batería ya se encuentra degradada en 300 ciclos de carga y descarga, y en la siguiente figura 4.5, está representado por la capacidad original de la batería (mAh), lo que nos indica que su capacidad original es de 2600mAh, pero a los 300 ciclos su capacidad original será de 2080mAh lo cual la batería se considera degradada.

Si solo se obtiene la gráfica por el fabricante y se tiene solo la capacidad original lo que se debe realizar es dividir, es decir en el ejemplo se tiene una capacidad inicial de 2600mAh, pero a los 300 ciclos se tendrá una capacidad de 2080 en este caso para conocer el porcentaje de degradación se divide los 2080mAh para 2600mAh y así obtenemos el porcentaje de degradación que es de 0.8%.

Por otra parte, si se obtiene el porcentaje de degradación y la capacidad original de la batería, en el ejemplo sería el 80% multiplicado por la capacidad original de la batería que es de 2600mAh y esto nos da como resultado 2080mAh de su capacidad original.

#### **4.2.1 Desarrollo del gráfico de dispersión**

Teniendo en cuenta que la mayoría de los ciclos de descarga no tienen la particularidad de iniciar con una batería totalmente cargada y terminar con una totalmente descargada, es por eso que el modelo que propone en esta investigación brinda la posibilidad de determinar la eficiencia de coulomb (2) corregida en función del SOC Range, a través de las 11 opciones para tres porcentajes de degradación y sus factores de escala correspondiente de la tabla 3.4.

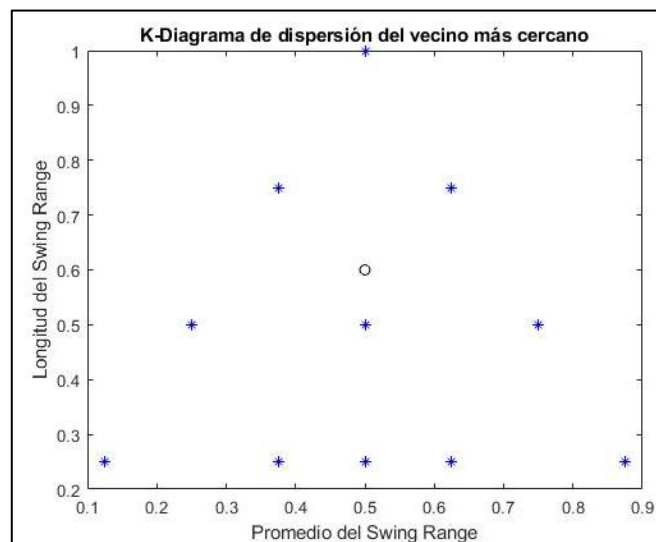
En el caso de no tener el SOC Range no esté representado en alguno de las 11 opciones de la tabla 3.4, se realiza el grafico de dispersión triangular de la figura 4.6, haciendo uso del Modelo basado en similitud que consta en identificar similitudes y relaciones entre las variables de un conjunto de observaciones en este caso sería los 3 vecinos más cercanos ya que esta metodología utilizada en esta investigación está basada en la regla del vecino más cercano, que consiste en estimar el valor de un dato desconocido a partir de las características del dato más próximo, según el Modelo basado en similitud.

Para encontrar los 3 vecinos más cercanos se utiliza el método de la inversa de las distancias que consiste en asignar el mayor peso a las muestras cercanas y menor peso a las muestras alejadas. En este caso se utilizó un SOC inicial y final (80,20), como primer paso se procede el

promedio del (SR) que corresponde al eje de las x y la longitud del (SR) que corresponde al eje de las y y donde los asteriscos representan los resultados de la longitud y el promedio del (SR), y el círculo negro representa el SOC alto y bajo, cabe recalcar que de igual manera se procede a realizar el promedio y longitud de dicho SOC como se muestra en la siguiente tabla 4.3 y figura 4.6.

**Tabla 4.3.** Cálculos para la representación gráfica del diagrama de dispersión.

Posiciones (SR)	Promedio (SR) eje_(x)	longitud (SR) eje_(y)	SOC_alto (80) eje_(x)	SOC_bajo (20) eje_(y)
1	0,5	1	0,5	0,6
2	0,625	0,75		
3	0,375	0,75		
4	0,75	0,5		
5	0,5	0,5		
6	0,25	0,5		
7	0,875	0,25		
8	0,625	0,25		
9	0,5	0,25		
10	0,375	0,25		
11	0,125	0,25		



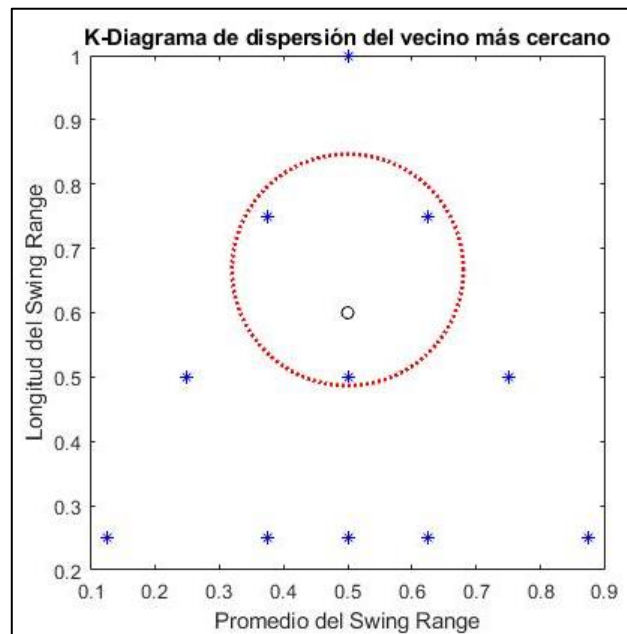
**Figura 4.6.** Representación de la longitud (SR), promedio (SR) y el SOC alto\_bajo.

Una vez realizado este cálculo se procede a ubicar los 3 vecinos más cercanos que están cerca del círculo negro que representa el SOC alto y SOC bajo, para la aplicación de los vecinos más cercanos usando el SBM (Similarity Based Model) y la metodología de los 3 vecinos cercanos. Ponderando la inversa de las distancias a las condiciones conocidas (3 de ellas), es posible determinar el valor del Eta\_bat en este caso como se muestra en la siguiente tabla 4.4 y figura 4.7.

**Tabla 4.4.** Cálculos de la eficiencia de Coulomb usando el SBM y la metodología de los 3 vecinos más cercanos.

Posiciones	Distancias	Inverso de la distancia asignación de pesos	Eta_f	Eta_bat
5	0,1	0,493999136	1,00001289252	0,999269347651738
2	0,195256242	0,253000432		
3	0,195256242	0,253000432		

Realizando los cálculos de los 3 vecinos más cercanos y ponderando la inversa de las distancias se obtiene un resultado que es nuestra Eta\_f, a este Eta lo multiplicamos por el Eta inicial que se obtuvo antes que corresponde al número de ciclos y el porcentaje de degradación de nuestra batería LIR18650 con la cual se está trabajando, una vez realizando dicho cálculo se obtiene un Eta final que en este caso los definimos como Eta\_bat que es igual a 0.999269347651738 como se observa en la tabla 4.4.

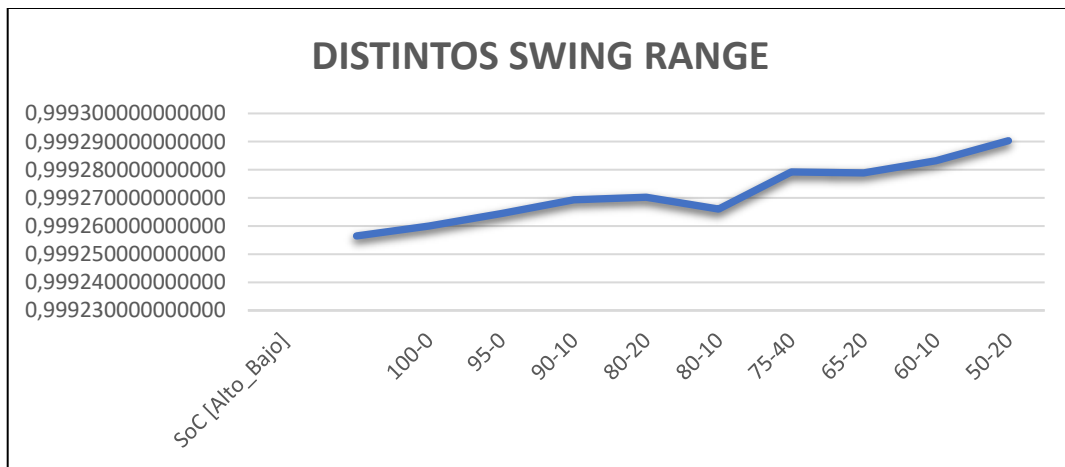


**Figura 4.7.** Diagrama de dispersión de los 3 vecinos más cercanos.

Para este ejemplo se realizó varios casos con SOC altos y Bajos para poder determinar el comportamiento de la degradación y poder observar con que rango de oscilación obtenemos un Eta mayor y un Eta menor como se puede observar en la siguiente tabla 4.5.

**Tabla 4.5.** Distintos Swing Range

	SOC [Alto_Bajo]	$\eta_k$ (Eta)
1	100-0	0,999256464721737
2	95-0	0,999260021229756
3	90-10	0,999264411985228
4	80-20	0,999269347651738
5	80-10	0,999270202392012
6	75-40	0,999266022058061
7	65-20	0,999279256647333
8	60-10	0,999278864623435
9	50-20	0,999283164907084
10	40-0	0,999290304571415

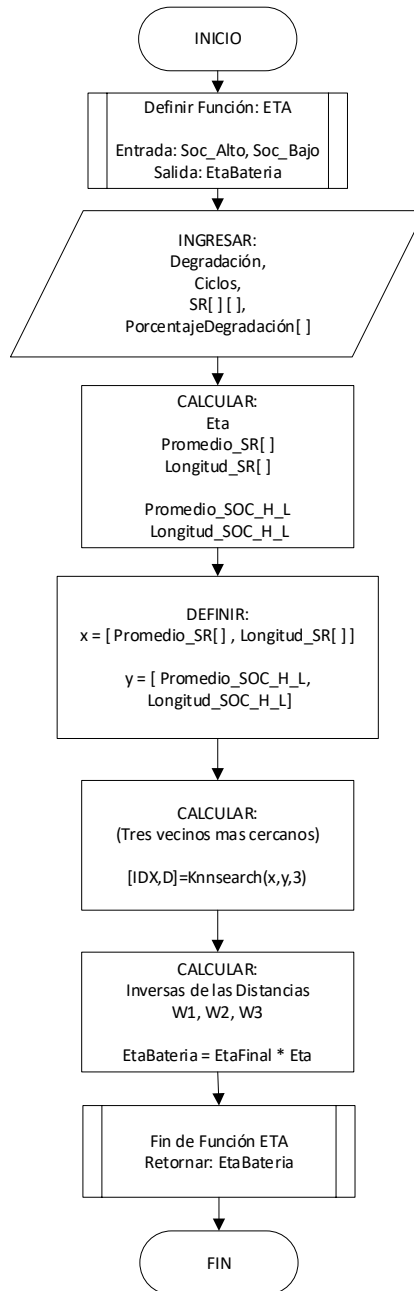


**Figura 4.8.** Distintos Swing Range.

Como se puede observar en la tabla 4.5 y figura 4.8 se realizó 10 intervalos con distintos SOC alto y SOC bajo en el cual se pudo determinar un Eta distinto para cada rango pues mientras mayor sea el número de intervalo en este caso (100-0) se tendrá un Eta menor en este caso será mayor el porcentaje de degradación de la batería, mientras que para un rango de (50-20) se tendrá un Eta mucho mayor en este caso el porcentaje de degradación será menor.

#### 4.2.2 Metodología para realizar una función que me permita calcular el Eta para distintos rangos de oscilación de la batería.

El diagrama de flujo de la figura 4.9, trata sobre la secuencia de pasos para la obtención de un Eta en un SOC alto y SOC bajo ingresados como parámetros en la función, la cual mediante la aplicación de la metodología de los 3 vecinos más cercanos (knnsearch) se calcula el Eta Final que se retorna como parámetro de salida en la función.



**Figura 4.9.** Diagrama de flujo de la metodología usada en la programación para el ingreso de SOC alto y SOC bajo para distintos Swing Range.

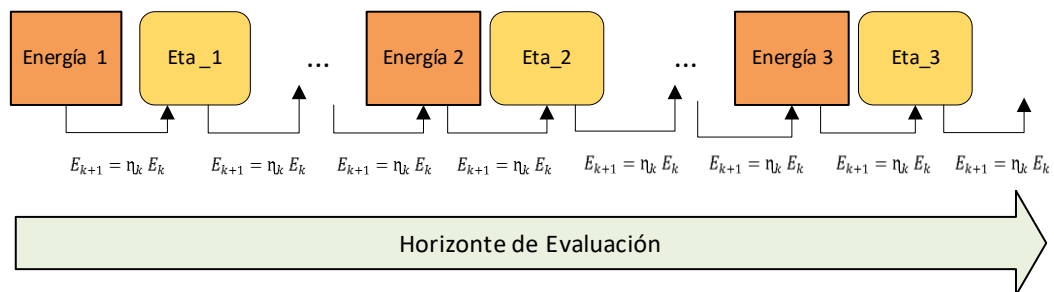
Como se observa en la figura 4.9, se crea una función el cual está definido como eta y esta función que tiene como datos de entrada SOC alto y SOC bajo y como salida se obtiene un EtaBateria. Dentro de la función, se ingresa los parámetros: porcentaje de degradación, el número de ciclos, la matriz SR de la tabla 4.2 y el vector PD que en este caso trabaja con 80%, una vez ingresado esos datos se realiza el cálculo de un Eta fijo, un vector de promedios y un vector de longitudes dependientes de SR; y a su vez, se calcula el promedio y longitud del SOC alto y SOC bajo de los parámetros ingresados en la función.

A continuación, se define un vector (x) donde se almacenan los datos de promedio y longitud del SR y otro vector (y) donde solo se almacena la longitud y el promedio del SOC alto y bajo ingresados en la función, que serán ingresados en la instrucción knnsearch, el cual realiza el cálculo de los 3 vecinos más cercanos donde IDX muestra en qué posición esta los 3 vecinos más cercanos y la D que representa a que distancia se encuentran.

Seguidamente se realiza el cálculo de los inversos de las distancias: W1, W2, W3 y se obtiene el Eta de la batería (EtaBateria) que se calcula multiplicando el Eta final por el Eta fijo obtenido inicialmente, de esta manera finaliza la función y retorna el valor de (EtaBateria) como parámetro de salida de la función.

### 4.2.3 Metodología usada en el caso de estudio de microrredes y vehículos eléctricos

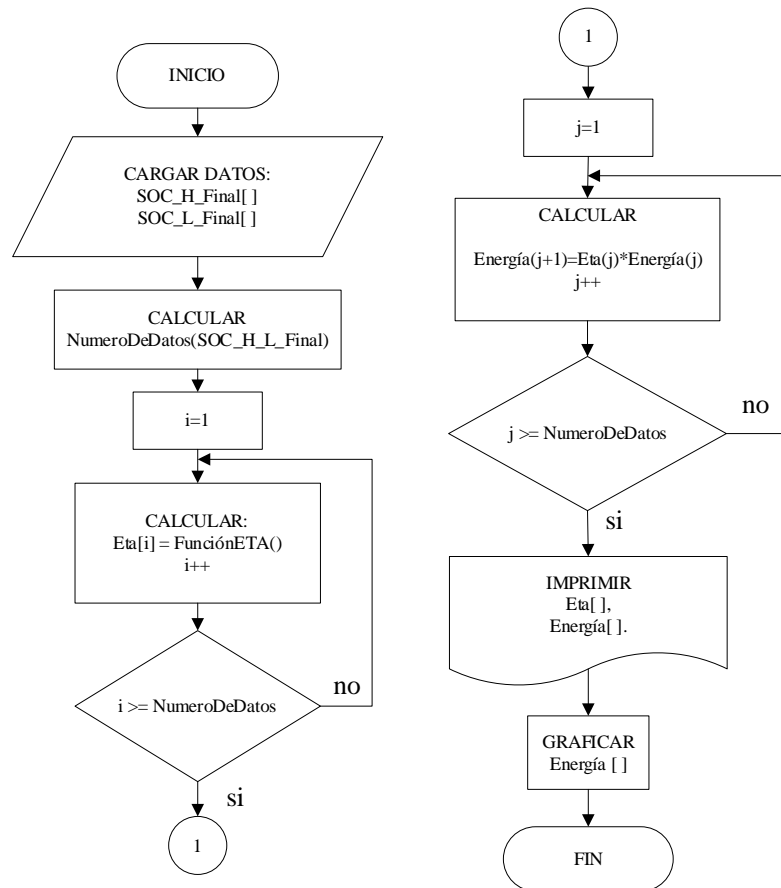
En la figura 4.10, muestra el proceso que lleva a cabo para la evaluación de la degradación de la batería en el caso de estudio de las microrredes y vehículos eléctricos, en el cual se tiene la energía inicial y se calcula un Eta, es decir calcula la energía actual y actualiza la energía y esto se va repitiendo en función al número de ciclos que este evaluado cada caso de estudio.



**Figura 4.1016.** Metodología utilizada en el caso de estudio y microrredes

#### 4.2.4 Metodología para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de una microrred real

El diagrama de flujo mostrado en la figura 4.11, indica el procedimiento que sigue la programación para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de una microrred real.



**Figura 4.11.** Diagrama de flujo secuencia de pasos para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de una microrred real.

Como primer paso se cargan los datos de SOC alto y SOC bajo obtenidos de una microrred real obtenidos de un despacho económico y se obtiene el número de datos de estos vectores, luego se inicializa un contador el cual indica que se realizara el cálculo del Eta llamando a la función que se creó en el apartado anterior 4.2.2, y tiene como condición, realizar el cálculo, las veces que indica en el número de datos de los vectores, los cuales se van almacenando en un nuevo vector.

Una vez realizado el cálculo del Eta para todos los estados de cargas de la microrred mediante otro contador, se realiza el cálculo de la Energía, que tiene como condición, se realice

el cálculo de la Energía las veces que indica en el número de datos que tiene la microrred y se van almacenando en otro vector. El cual, al finalizar se imprime un vector de Eta y un vector de energía y se muestra la gráfica correspondiente a la energía.

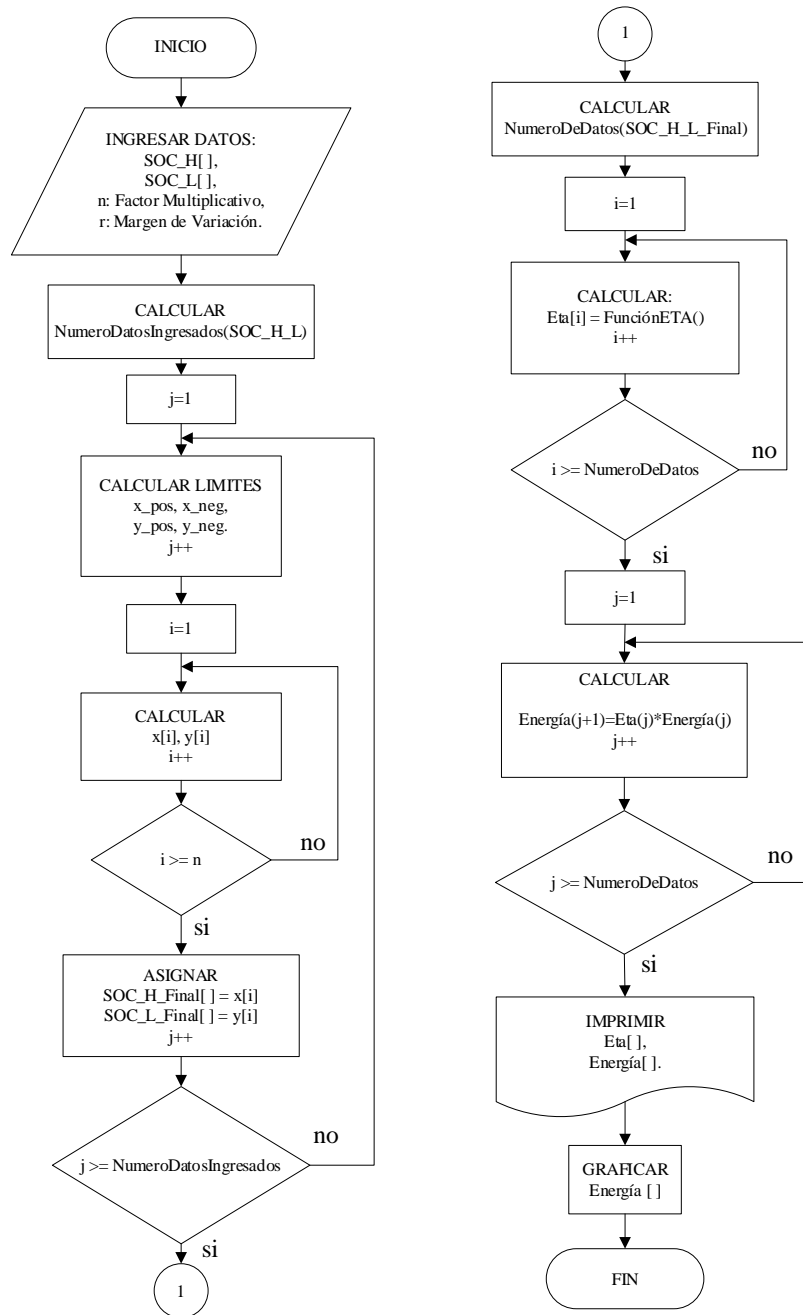
#### **4.2.5 Metodología para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de un vehículo eléctrico aplicando la técnica Montecarlo.**

El diagrama de flujo que se aprecia en la figura 4.12, muestra la secuencia de pasos que sigue la programación para la obtención de la gráfica de la energía a partir de SOC altos y SOC bajos de un vehículo eléctrico aplicando la técnica de Montecarlo.

Inicialmente se ingresan los datos SOC alto y SOC bajo obtenidos de las distintas rutas realizadas por el vehículo eléctrico, y se obtiene el número de datos ingresados. También se ingresa un factor multiplicativo (n) y un margen de variación (r) que se aplicaran en la técnica Montecarlo para la obtención del SOC\_alto y SOC\_bajo Final.

Luego se inicializa un contador con el cual se realizará los cálculos de las variables  $x_{positivo}$ ,  $x_{negativo}$ ,  $y_{positivo}$ ,  $y_{negativo}$  que representan los límites de variación para cada estado de carga. Dentro del mismo bucle se crea otro contador mediante el cual se obtiene un vector ( $x_i$ ), y un vector ( $y_i$ ), que contienen los datos de estados de carga en Alto y Bajo calculados mediante la técnica de Montecarlo, de la misma forma tiene como condición, realizar el cálculo de los valores las veces que indica el factor multiplicativo. Estos vectores ( $x_i$ ), ( $y_i$ ) son asignadas a los vectores SOC\_H\_Final y SOC\_L\_Final, y se va acumulando hasta cumplir el número de datos de SOC\_alto y bajo ingresados.

Mediante los vectores SOC\_H\_Final y SOC\_L\_Final obtenidos se aplica la Metodología 4.2.4, que en este caso está enfocado al caso de estudio de los vehículos eléctricos, en el cual se obtiene el vector de Eta mediante la función del apartado 4.2.2, con el cual se realiza el cálculo de las energías correspondientes a cada estado de carga. Finalmente se imprime un vector de Eta y un vector de Energía y se muestra la gráfica del vector de Energía Correspondiente.



**Figura 4.12.** Diagrama de flujo de la metodología usada en la programación para el caso de estudio en vehículos eléctricos.

### 4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

#### 4.3.1 Sinterización de la información

Esta técnica se empleó debido a la información obtenida en diferentes fuentes bibliográficas ya que es la base para efectuar un análisis que brinde el mejor desempeño de la propuesta tecnológica como sustento contextual y práctico. Además, resalta los aspectos más importantes con el objetivo de evaluar un modelo de degradación de la batería de Ion Litio.

### **4.3.2 Software Matlab**

A partir del modelo matemático  $E_{k+1} = \eta_k E_k$  se desarrolla el código correspondiente para la evaluación de un modelo de degradación de una batería de Ion Litio, en el software MATLAB versión R2020a, que utiliza un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente.

### **4.3.3 Datasheets**

Los datasheets son facilitados por los fabricantes de baterías de Ion Litio detallado en el anexo A cuya información se utiliza para obtener el % de degradación, la capacidad nominal y los ciclos de la batería, con estos datos se puede determinar la eficiencia de Coulomb y la energía siguiente.

### **4.3.4 Artículos científicos**

Los artículos científicos utilizados principalmente en este trabajo de investigación son [6], [18], [8], de los cuales se utilizan la teoría y la ecuación que es parte fundamental ya que es nuestro modelo matemático.

### **4.3.5 Modelo matemático**

#### **4.3.5.1 Formulación matemática**

En este trabajo de investigación se propone la evaluación de un modelo de degradación de una batería de ion litio para aplicaciones en microrredes y vehículos eléctricos. En el caso de estudio para cada aplicación se obtendrá un costo beneficio.

Para la evaluación del modelo matemático  $E_{k+1} = \eta_k E_k$  nos permite obtener la energía siguiente actualizando la energía anterior y multiplicando por el Eta, hay que tener en cuenta si es un Eta fijo o un Eta variable ya que con dicho modelo se puede obtener la gráfica de la energía en distintos SOC y observar en cuantos ciclos la batería se encuentra degradada.

#### **4.3.5.3 Montecarlo usado en el caso de estudio de los vehículos eléctricos**

Se consideró esta técnica de cálculo numérico no determinística, en el cual los valores obtenidos de [8] se generó números aleatorios respecto a los SOC altos y SOC bajos del vehículo eléctrico, ya que solo se obtuvo 47 datos, era necesario realizar la simulación de Montecarlo y para no tener mucho margen de errores se fue cambiando valores de acuerdo a las circunstancias puntuales.

## **5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

En el desarrollo de esta investigación se llevaron a cabo una serie de actividades relacionadas con el conocimiento y manejo del software Matlab para la evaluación de un modelo de degradación de baterías de Ion litio para aplicaciones en microrredes y vehículos eléctricos.

### **5.1 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO EN EL CASO DE ESTUDIO DE LAS MICRORREDES**

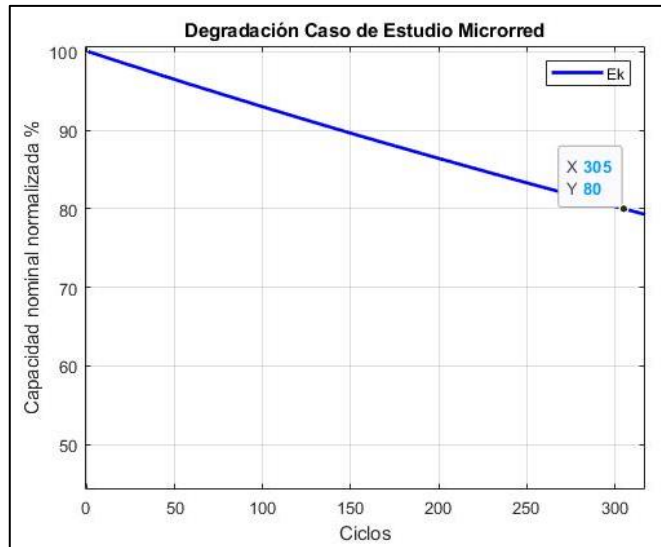
#### **5.1.1 Datos de SOC altos y SOC bajos de un despacho económico de una microrred real**

Los datos son obtenidos de [17], que según su autor para la obtención de los datos se analizó cada 24 horas (un día), actualizando la energía en el cual se obtuvo la energía inicial y energía final de cada ciclo y de cada ciclo se obtuvo SOC alto y SOC bajo, identificando un despacho económico óptimo para 168 horas (una semana) cuyos datos de entrada son datos de demanda, potencia solar fotovoltaica, potencia eólica y energía del BESS y se obtuvo datos de SOC inicial y SOC final de cada ciclo.

Las baterías alcanzan su mayor carga de energía a las 12 horas del día, ya que es el periodo de mayor irradiación solar que permite generar la potencia necesaria para cubrir la demanda y recargar la energía del BESS. Mientras que a partir de la hora 18 empezará a descargarse, alcanzado su descarga completa a la hora 24 aproximadamente [17].

Para la realizar la simulación se obtuvo 2675 datos, que según el autor se trabajó con la siguiente batería [22], y según el fabricante la batería tiende a degradarse en a los 5000 ciclos y su porcentaje de degradación es de 0,8%. Una vez teniendo en cuenta estas condiciones para nuestro ejemplo se procedió a usar la misma batería que analizamos desde un comienzo que es la batería LIR18650.

Se ingresa en el programa de Matlab los 2675 datos de SOC altos y SOC bajos de una microrred real, para así realizar el cálculo con la función creada inicialmente, realizando dicho calculo se obtiene un Eta final para cada caso de SOC alto y SOC bajo, después de obtener los Etas para cada caso se procede a calcular la energía siguiente para cada eta y así obtener la figura 5.1, de la energía.



**Figura 5.1.** Degradación de la batería LIR18650 aplicado en el caso de estudio de la microrred representado en su capacidad nominal normalizada en porcentaje.

Como se observa en la figura 5.1, se obtiene el gráfico de la energía en función a los datos obtenidos en un despacho económico de una microrred real evaluada con la batería LIR18650 se tiene que al 80% de la capacidad normalizada se obtiene 305 ciclos que será cuando la batería se considere degradada.

Se utilizó otra batería propia de una microrred analizada según el fabricante [22], para lo cual hay que fijarse en su capacidad nominal y el número de ciclos de vida que da el fabricante y dichos datos lo podemos observar en la tabla 5.1.

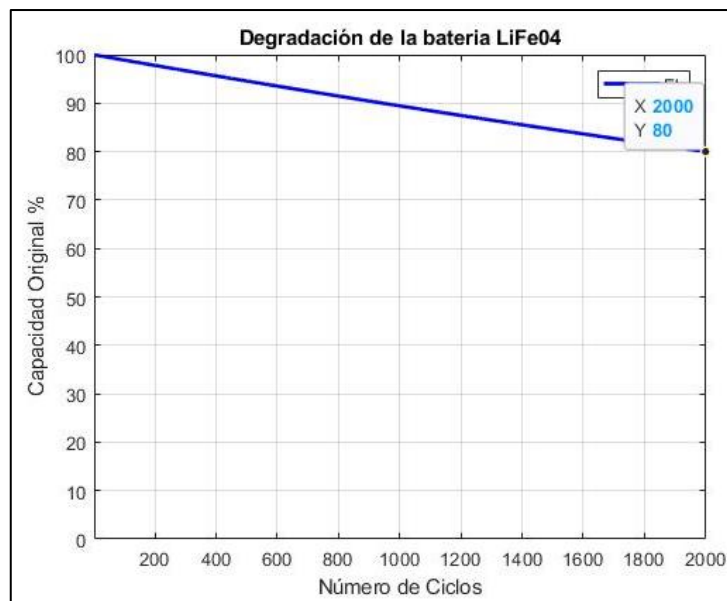
**Tabla 5.1.** Datos técnicos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) [22].

Especificaciones técnicas	
Modelo	LBS-12-100
Configuración	4 celdas de 3,2 V/100 Ah
Tipo	Fosfato de hierro y litio (LiFePO4)
Capacidad nominal	100 Ah
Voltaje nominal	12,8 V
Esperanza de vida	2000 ciclos (80% DOD)
Voltaje de carga	13,8 V-14,6 V
Corriente de carga máxima	100A
Corriente de descarga máxima	250A
Temperatura de funcionamiento	0° – 45°C
Peso	15,7 kg
Dimensiones (L x An x Al)	320x160x333mm

Como se observa en la figura 5.2, se observa el % de degradación que da el fabricante, su número de ciclos y la capacidad nominal de la batería y se obtiene la degradación de la batería LBS-12-100(LiFePO4), dicha batería se encuentra degradada al 80% de su capacidad nominal en 2000 ciclos cuyos resultados se muestra en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Resultados obtenidos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) según el fabricante.

Capacidad Nominal	Ciclos al 80%	Eta ( $\eta_k$ )
100Ah	2000	0,999888434448242

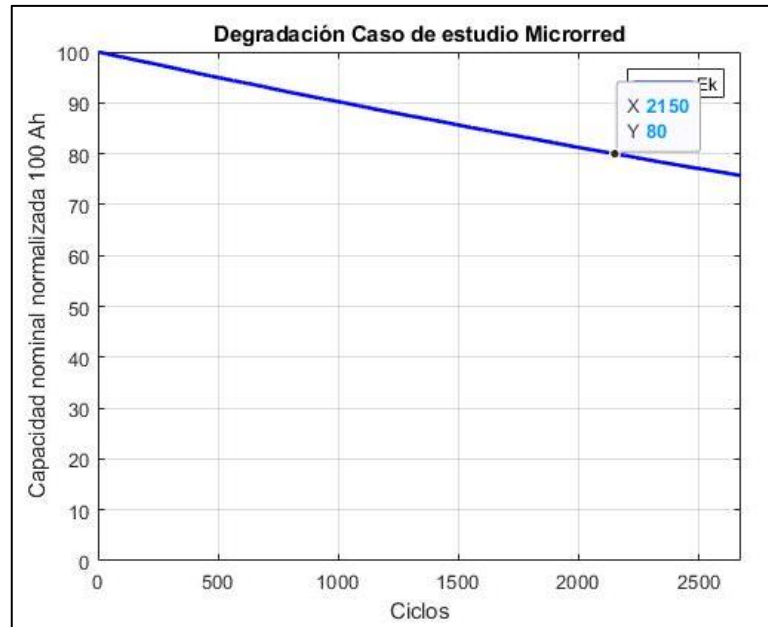


**Figura 5.2.** Degradación de la batería LBS-12-100(LiFePO4) en Ah.

Aplicando el modelo propuesto ingresando los datos de SOC alto y SOC bajo de una microrred real y utilizando la batería LBS-12-100(LiFePO4), se realiza la simulación, y se obtiene la gráfica de la energía en el que se observa al 80% de la capacidad nominal se obtiene 2150 ciclos es decir se tiene una ganancia de 150 ciclos adicionales como se muestra en la tabla 5.3 y figura 5.3.

**Tabla 5.3.** Resultados obtenidos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) en el caso de estudio de las microrredes.

Capacidad Nominal	Ciclos al 80%
100Ah	2150



**Figura 5.3.** Degradación de la batería LBS-12-100(LiFePO4) aplicado en el caso de estudio de la microrred representado en su capacidad nominal normalizada en Ah.

### 5.1.2 Análisis económico de la batería LiFeO4 en el caso de estudio de la Microrred

Para el análisis económico se tomó en cuenta el costo de la batería LBS-12-100(LiFePO4) y los ciclos al 80% que da el fabricante, de la misma forma los datos que se obtiene con el modelo propuesto, de esta manera se podría decir si el modelo propuesto es factible para ello lo clasificamos en las siguientes tablas 5.4 y 5.5.

**Tabla 5.4.** Datos obtenidos de la batería LBS-12-100(LiFePO4) según el fabricante.

Datos obtenidos por el fabricante		
Capacidad Nominal	Ciclos al 80%	Eta ( $\eta_k$ )
100Ah	2000	0,999888434448242

**Tabla 5.5.** Resultados obtenidos aplicando nuestro modelo en el caso de estudio de las microrredes.

Datos del modelo propuesto aplicado al caso de estudio de las microrredes	
Capacidad Nominal	Ciclos al 80%
100Ah	2150

Para este análisis se procedió a determinar el precio referencial de dicha batería con esto se establecería un costo en USD, según [17], la batería tiene un costo alrededor de los 151.000\$, una vez obtenido el costo nos permitiría aplicar una simple regla de tres para obtener en porcentaje y USD según lo que nos da el fabricante y aplicando nuestro modelo que ganancia podemos obtener entonces para el primer análisis se lo realizo en porcentaje.

**Tabla 5.6.** Aplicación de la regla de tres en porcentaje.

	<b>Ciclos</b>	<b>%</b>
<b>Fabricante</b>	2000	100
<b>Caso de Estudio</b>	2150	<b>107.5%</b>

Como se observa en la tabla 5.6, aplicando la regla de tres se puede decir que con el caso de estudio evaluado en las microrredes obtengo 150 ciclos adicionales lo que representa un beneficio, ya que con el modelo evaluado se está ganando adicional 7,5% ciclos adicionales.

Por otra parte, cabe recalcar que en el tema de las microrredes un ciclo dura un día, con los 150 ciclos adicionales que obtuve tendría 150 días adicionales, y si estos 150 días los divido para 30 días que tiene un mes tendría 5 meses de extensión de vida útil.

**Tabla 5.7.** Aplicación de la regla de tres en USD.

	<b>Ciclos</b>	<b>USD \$</b>
<b>Fabricante</b>	2000	151.000
<b>Caso de Estudio</b>	2150	<b>162.325</b>

Como se observa en la tabla 5.7, aplicando la regla de tres se puede decir que con el caso de estudio evaluado en las microrredes se obtiene 150 ciclos adicionales y esto representa una ganancia de 11.325\$ en sentido de ciclos, esto quiere decir que ayuda a minimizar el costo de reemplazo.

Para el caso de estudio en las microrredes está limitada a las suposiciones dadas por el fabricante ya que existe una temperatura controlada de 25°C que no está incluido en el modelo evaluado [17].

}

## 5.2 VALIDACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO EN EL CASO DE ESTUDIO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

### 5.2.1 Datos de SOC altos y SOC bajos de un vehículo eléctrico

Los datos son obtenidos de [8], que considera el estudio de una serie de rutas o trayectorias, son divididas en tres grupos que comprenden según la distancia recorrida:

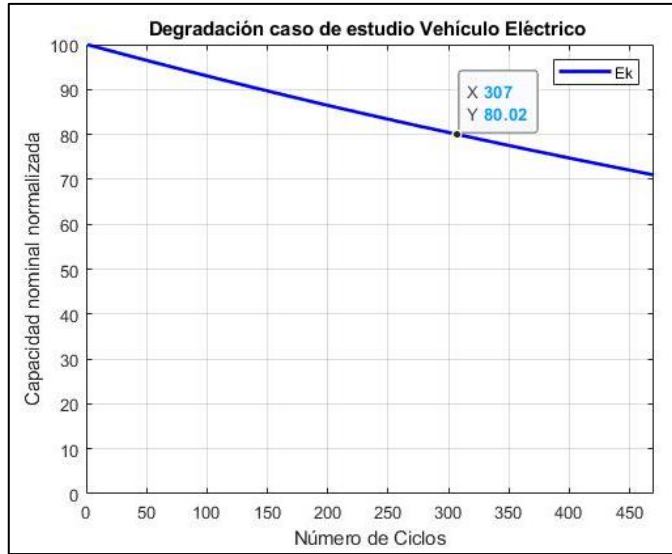
- 1) **Rutas cortas:** trayectorias menores a 10 kilómetros.
- 2) **Rutas medianas:** trayectos entre 10 y 30 kilómetros.
- 3) **Rutas largas:** trayectos mayores a 30 kilómetros.

A través de esos criterios se obtuvo SOC altos y SOC bajos de un vehículo eléctrico, la ruta corta se encuentra caracterizada por ser trayectos dentro de la ciudad, las rutas medianas poseen trayectorias combinadas entre ciudad y autopista de alta velocidad y finalmente las rutas largas que están constituidas principalmente por ciclos de alta velocidad y trayectos asociados a viajes entre ciudades.

En este caso se obtuvo 47 datos de SOC alto y SOC bajo respecto a las rutas: cortas, medianas y largas, ya que se necesitaba alrededor de 300 a 400 datos por lo que se recurrió al uso de la técnica de Montecarlo el cual se le dio un factor multiplicativo de 10 esto para cada SOC alto y SOC bajo y un margen de variación de 0,5, en el cual se obtuvo 470 datos en función a los datos conocidos de SOC alto y SOC de un vehículo eléctrico.

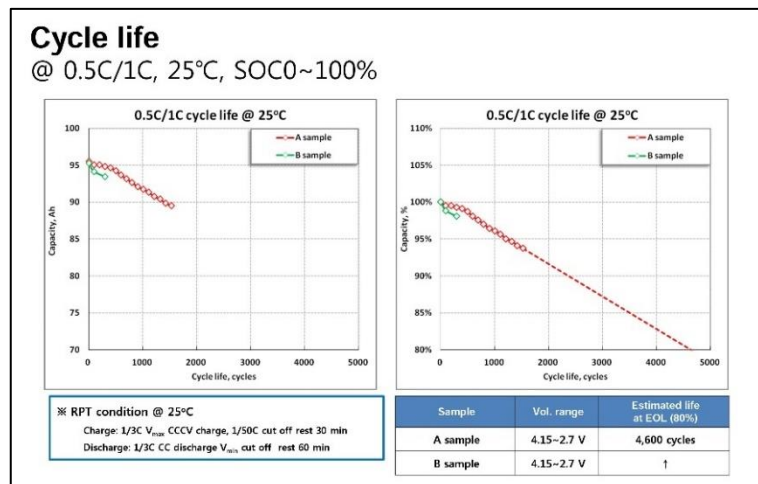
Para este caso de estudio se utilizó la batería LIR18650 que se trabajó desde un principio en el cual ya obtenidos los 470 datos de SoC altos y SoC bajos se realiza el cálculo en Matlab de acuerdo a la función calculada inicialmente y se obtiene un Eta final para cada SOC alto y SOC bajo, obtenidos los datos de los valores se procede a calcular la energía siguiente para cada eta y así obtener la gráfica de la energía.

Como se observa en la figura 5.4, se obtiene el grafico de la energía en función a los datos obtenidos de las tres rutas cortas, medianas y largas aplicando Montecarlo, estos datos de SOC alto y SOC bajos son evaluados con la batería LIR18650 se tiene que al 80% de la capacidad normalizada se obtiene 307 ciclos, es decir 7 ciclos adicionales a lo que el fabricante da cuando se considera degradada.



**Figura 5.4.** Degradación de la batería LIR18650 aplicado en el caso de estudio de un vehículo eléctrico representado en su capacidad nominal normalizada en porcentaje.

Como otro ejemplo se utilizó una batería de un vehículo eléctrico modelo BMW i3 que según los datos del fabricante [23], nos da en la siguiente figura 5.5, en el cual nos indica que su capacidad nominal es de 94Ah y su % de degradación es del 80% en 4600 ciclos de vida de la batería.

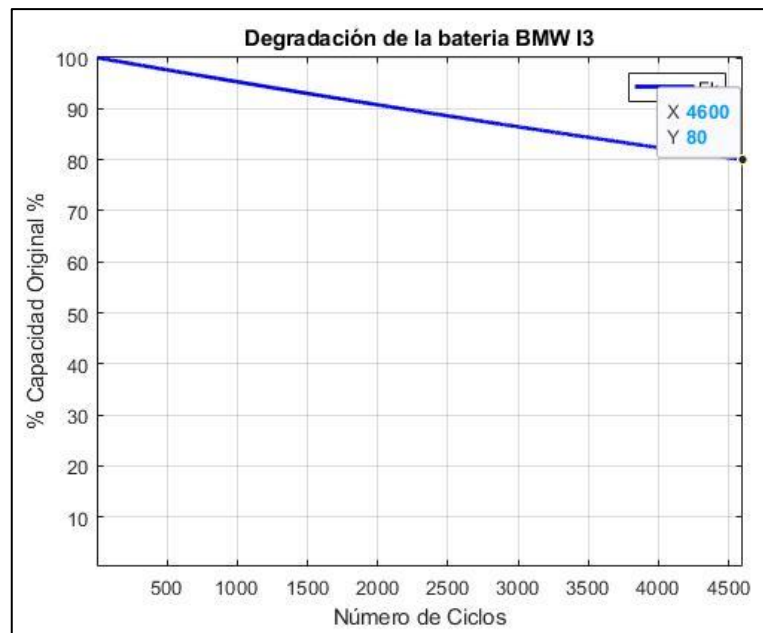


**Figura 5.5.** Datos del fabricante de la batería BMW i3 [23].

Como se puede observar en la figura 5.6, se tiene que inicia en su capacidad nominal de 100%, pero conforme se va utilizando al 80% de su capacidad nominal se encontrara degradada a los 4600 ciclos de carga y descarga los resultados obtenidos se observa en la tabla 5.8.

**Tabla 5.8.** Resultados obtenidos de la batería del vehículo eléctrico BMW i3 en porcentaje según el fabricante.

Capacidad Nominal %	Ciclos al 80%	Eta ( $\eta_k$ )
100	4600	0,999951491708888

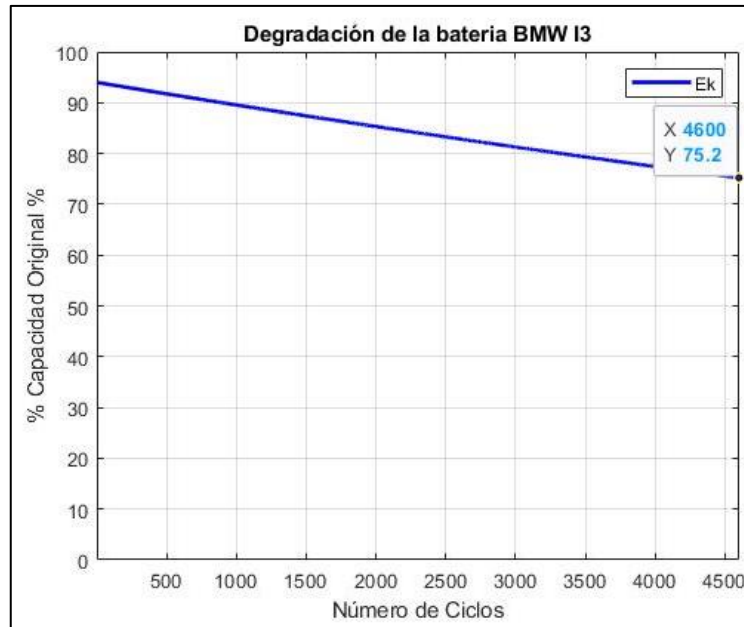


**Figura 5.6.** Degradación de la batería BMW i3 representado en porcentaje de la capacidad original según el fabricante.

Por otra parte, se representó la batería en su capacidad nominal de 94 Ah, ya que es su capacidad nominal, pero al 75.20 de su capacidad nominal se encuentra degradada la batería en 4600 ciclos, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla 5.9.

**Tabla 5.9.** Resultados obtenidos de la batería del vehículo eléctrico BMW i3 en Ah según el fabricante.

Capacidad Nominal Ah	Capacidad al 80%	Ciclos al 80%	Eta ( $\eta_k$ )
94	75,2	4600	0,999951491708888

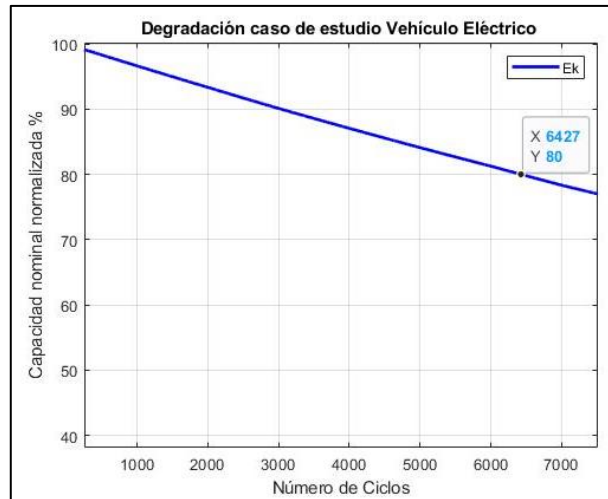


**Figura 5.7.** Degradación de la batería BMW i3 representado en Ah de la capacidad original según el fabricante.

Aplicando el modelo propuesto ingresando los datos de SOC alto y SOC bajo de un vehículo eléctrico, utilizando la técnica de Montecarlo se obtuvo para este caso 47000 datos y utilizando la batería Bmw i3, se realiza la simulación, y se obtiene la gráfica de la energía en el que se observa al 80% de la capacidad nominal obtenemos 6427 ciclos es decir se tiene una ganancia de 1827 ciclos adicionales a lo que el fabricante da como se muestra en la tabla 5.10 y figura 5.8.

**Tabla 5.10.** Resultados obtenidos de la batería BMW i3 en el caso de estudio de los vehículos eléctricos.

Capacidad Nominal %	Ciclos al 80%
100Ah	6427



**Figura 5.8.** Degradación de la batería BMW i3 aplicado en el caso de estudio del vehículo eléctrico representado en su capacidad nominal normalizada en porcentaje.

### 5.2.2 Análisis económico de la batería BMWi3 en el caso de estudio del vehículo eléctrico

Para el análisis económico se tomó en cuenta el costo de la batería de un vehículo eléctrico BMW i3 y los ciclos al 80% que da el fabricante, de la misma forma los datos que se obtiene con el modelo evaluado, de esta manera se podría decir si el modelo propuesto es factible para ello se lo clasifica en la siguiente tabla 5.11 y 5.12.

**Tabla 5.11.** Datos obtenidos de la batería BMW i3 según el fabricante.

Datos obtenidos por el fabricante		
Capacidad Nominal %	Ciclos al 80%	Eta ( $\eta_k$ )
100	4600	0,999951491708888

**Tabla 5.12.** Resultados obtenidos aplicando nuestro modelo en el caso de estudio de los vehículos eléctricos.

Datos del modelo propuesto aplicado al caso de estudio de las microrredes	
Capacidad Nominal %	Ciclos al 80%
100	6427

Para este análisis se procedió determinar el precio referencial de dicha batería con esto se establecería un costo en USD, según [24] , la batería tiene un costo alrededor de los 18.000\$,

una vez obtenido el costo se puede aplicar una simple regla de tres para obtener en porcentaje y USD según lo que nos da el fabricante y con el modelo aplicado se puede determinar que ganancia se puede obtener, entonces para el primer análisis se lo realizo en porcentaje.

**Tabla 5.13.** Aplicación de la regla de tres en porcentaje.

	<b>Ciclos</b>	<b>%</b>
<b>Fabricante</b>	4600	100
<b>Caso de Estudio</b>	6427	139,71%

Como se observa en la tabla 5.13, aplicando la regla de tres se puede decir que con el caso de estudio evaluado en los vehículos eléctricos obtengo 1827 ciclos adicionales lo que representa un beneficio, ya que con el modelo evaluado se está ganando adicional 39,71% ciclos adicionales.

**Tabla 5.14.** Aplicación de la regla de tres en USD.

	<b>Ciclos</b>	<b>USD \$</b>
<b>Fabricante</b>	4600	18.000
<b>Caso de Estudio</b>	6427	25.149,13

Como se observa en la tabla 5.14, aplicando la regla de tres se puede decir que con el caso de estudio evaluado en los vehículos eléctricos con los 1827 ciclos adicionales que se obtiene una ganancia de 7149.13\$ en sentido de ciclos, esto quiere decir que ayuda a minimizar el costo de reemplazo.

Para el caso de estudio de estudio de los vehículos eléctricos está limitada a las suposiciones dadas por el fabricante ya que existe una temperatura controlada de 25°C, 0.5C/1C, SOC 0 – 100%, que no está incluido en el modelo evaluado [23], y por otra parte según el autor [8], donde se obtuvo los datos considero una serie de aspectos para la obtención de SOC iniciales y finales.

- Potencia por tracción: asociada a la aceleración del vehículo.
- Potencia por resistencia aerodinámica: asociada a la fuerza que genera el aire, oponiéndose al movimiento del móvil.
- Potencia por roce en rodadura: proviene de la interacción de los neumáticos con el piso y se opone al movimiento del vehículo.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

En el estado del arte se identificó que muchos investigadores aplican varias metodologías para evaluar modelos de degradación de batería entre los cuales se identificó modelos físicos, químicos abstractos, electroquímicos y empíricos, para esta investigación se optó por un modelo empírico ya que cumplía con los requerimientos que se necesitaba para el trabajo de investigación, y este modelo evaluado aproxima de mejor manera los ciclos que el fabricante ya que evalúa la degradación real en cada ciclo de cada uso de la batería, que se toma en cuenta el SOC de carga / descarga identificación bajo medición y no como el fabricante lo asume del 100 – 0%.

En el caso de estudio evaluado en el contexto de las microrredes se partió de datos reales de una microrred por medio de un despacho económico, donde se obtuvo datos de SOC altos y SOC bajos, con dichos datos se obtuvo la gráfica de la energía y se evaluó con dos baterías distintas, la primera es la batería LIR18650 que se obtuvo con el modelo evaluado 305 ciclos y el fabricante solo daba 300 ciclos de vida al 80%, entonces se puede decir que aplicando el modelo se obtendría 5 ciclos adicionales, por otra parte se analizó con otra batería LBS-12-100(LiFePO4) según el fabricante daba que a los 2000 ciclos la batería se encuentra degradada y con el modelo da 2150 ciclos en 80%, es decir con el modelo evaluado se obtiene una ganancia de 150 ciclos adicionales, cabe recalcar que los datos obtenidos están bajo ciertas suposiciones dadas por el fabricante considerando un control de temperatura de 25°C.

.Para la evaluación en el contexto de los vehículos eléctricos utilizo inicialmente la batería LIR18650 que según el fabricante a los 300 ciclos del 80% de su capacidad nominal se encuentra degradada, mientras que con nuestro modelo evaluado se obtiene 307 ciclos al 80% de su capacidad inicial, es decir se tiene una ganancia de 7 ciclos adicionales, por otra parte también se evaluó con una batería de un BMW i3 que según el fabricante a los 4600 ciclos del 80% de su capacidad nominal se encuentra degradada, mientras que con nuestro modelo se obtiene 6427 ciclos del 80% de su capacidad inicial, es decir 1827 ciclos adicionales, cabe recalcar que los datos obtenidos están bajo ciertas suposiciones dadas por el fabricante considerando un control de temperatura de 25°C.

En el análisis económico respecto al caso de estudio de las microrredes se tiene que el costo de la batería es de 151.000\$ y con el modelo evaluado se ahorraría 11.325\$ en minimizar el

costo de reemplazo lo que representa un 7.5%, que en ciclos son 150 ciclos más de vida útil para la batería evaluada es decir su vida útil sería de 5 meses más a lo que dice el fabricante mientras que en el análisis económico respecto al caso de estudio de los vehículos eléctricos la batería de un vehículo eléctrico en específico el bmwi3 está alrededor de 18.000\$ y el costo del vehículo Bmw i3 esta alrededor de los 70.000\$, con el modelo evaluado se tiene un 39.71%, que representa 1827 ciclos de ganancia que equivalente a 7149.13\$ lo que concierne un costo considerable que gana con el modelo evaluado el cual minimizara el costo de reemplazo de la batería, estos beneficios en los dos casos de estudio están basados en supuestos dados por el fabricante y suposiciones del autor del trabajo de investigación.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Para la investigación bibliográfica referida a la evaluación de un modelo de degradación de una batería de ion litio para aplicaciones en microrredes y vehículos eléctricos se recomienda analizar detenidamente los conceptos y su modelo matemático, ya que sus conceptos y modelo matemático es fundamental para este tipo de trabajos de investigación.

En la evaluación del modelo propuesto se recomienda revisar bien los datos dados por el fabricante en la hoja de especificaciones para reemplazar en la formula como son el porcentaje de degradación de la batería, los ciclos de vida útil y su capacidad nominal ya que si no se revisa bien se tendrá problemas al momento de su análisis.

En los casos de estudios propuestos como son las microrredes y vehículos eléctricos se recomienda usar una batería acorde al caso de estudio ya que con eso se podrá obtener datos reales y se tendrá un mejor entendimiento en cuanto a ciclos proporcionados por el fabricante y ciclos obtenidos en la simulación.

Se recomienda en futuras investigaciones utilizar otros métodos basados en similitud para identificar el mejor punto respecto a sus distancias los cuales son: Distancia Euclidiana, Distancia Chebyshev, Distancia Manhattan, Distancia Kullback - Leibler, para así tener un mejor dato distintos en función a los métodos mencionados y observar cual se aproxima de mejor manera.

Se recomienda utilizar otro tipo de modelo matemático para comparar ambos y evidenciar su funcionamiento.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. P. a. E. Society, «IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications,» p. 47, 2017.
- [2] VERITV, «EL SURGIMIENTO DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO EN LOS CENTROS DE DATOS,» p. 8, 2017.
- [3] W. GUO y W. HEALY, «Power Supply Issues in Battery Reliant Wireless Sensor Networks: A Review,» vol. 19, nº 1, p. 9, 2014.
- [4] A. Pico, P. Pazmiño y Ponce B, «Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio,» p. 9, 2021.
- [5] V. Quintero , C. Osvaldo , E. Ching y O. Auciello, «Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones,» vol. 17, nº 1, p. 9, 2020.
- [6] A. Pérez, V. Quintero, H. Rozas, F. Jaramillo, R. Moreno y M. Orchard, «Modelling the Degradation Process of Lithium-Ion Batteries When Operating at Erratic State-of-Charge Swing Ranges,» p. 6, 2017.
- [7] K. A. Zolis, MODELADO ELECTROTÉRMICO DE BATERIAS DE LITIO PARA DETERMINAR SU ENVEJECIMIENTO MEDIANTE LA ENTROPÍA IRREVERSIBLE, España: UNISITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONA TECH, 2017.
- [8] D. M. CARBACHO VARAS, ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO SOMETIDO A DIVERSAS CONDICIONES EN LA ZONA CENTRAL Y SUR DE CHILE, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, 2020.
- [9] A. Peres Mora, «Conceptos y modelos básicos de las baterías de ión-litio,» 22 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=vVhhWVDq24M&t=2293s>.
- [10] A. J. Alvarez Barragán, Efecto de la química de superficies en un ánodo de batería de ion litio, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [11] E. G. Olmo , CARACTERIZACIÓN DE BATERÍAS DE LITIO PARA ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO, Madrid: UNOVERSIDAD POLITÈCNICA DE MADRID, 2019.

- [12] R. A. Heredia , Modelado de Degradación de Baterías con Aplicaciones para Coche Eléctrico y Almacenamiento Distribuido, Madrid: ESCUELA TÉCNICA SUPERIRO DE INGENIERÍA (ICAI), 2016.
- [13] S. Bhaskar y G. Kai, «Modeling Li-ion Battery Capacity Depletion in a Particle Filtering Framework,» p. 10, 2009.
- [14] Á. I. Rodríguez Cea y F. Tinaut Fluixá, MODELO PARA LA BATERÍA DE ION DE LITIO DE UN VEHICULO ELÉCTRICO, España: cidaut, 2017.
- [15] D. Schonfeld y L. Gong, «SPACE KERNEL ANALYSIS,» p. 5, 2014.
- [16] M. Arriagada Rodríguez , Comparación de métricas de distancia en el algoritmo K-Vecinos Más Cercanos para el problema de Reconocimiento Automático de Dígitos Manuscritos, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA INFORMÁTICA, 2015.
- [17] A. F. Jaya Carvaja y . D. E. Lagla Chasiluisa, DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO MEDIANTE PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL, Latacunga: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXIFACULTADDE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADASINGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOSDE POTENCIA, 2021.
- [18] D. Jiménez, D. Ortiz Villalba , A. Perez y M. Orchard , «Lithium-ion Battery Degradation Assessment in Microgrids,» p. 6, 2018.
- [19] A. Perez, R. Moreno, R. Moreira y M. Orchard, «Effect of Battery Degradation on Multi-Service Portfolios of Energy Storage,» p. 12, 2016.
- [20] D. S. Sierra Vergara , Determinación metodológica del hosting capacity de vehículos eléctricos en sistemas de distribución considerando la relación THD-SOC de las baterías., LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, 2019.
- [21] EEMB, «Lithium-ion Battery DATA SHEET,» 11 2010. [En línea]. Available: <http://eemb.com>.
- [22] L. B. Systems, «Mechanical Specifications LiFePO4 Datasheet Electrical Specification Dimension (with case) LiFePO4-12V 100Ah JB-LFP12-100CC Discharge Specifications

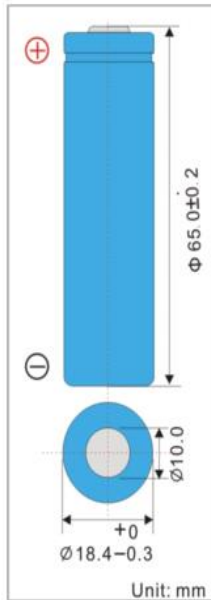
Temperature Specifications Connection information,» [En línea]. Available: [www.lithiumbatterysystems.com.au](http://www.lithiumbatterysystems.com.au).

[23] FCE, «Forococheelectricos,» 29 05 2018. [En línea]. Available: <https://forococheelectricos.com/2018/05/samsung-bateria-bmw-i3-larga-duracion-kilometros.html>.

[24] ebay, «BMW I01 I3 OEM Batería de alto voltaje 94AH 6125 2412036,» 21 02 2022. [En línea]. Available: <https://www.ebay.com/itm/154792121768?hash=item240a5455a8:g:8wsAAOSwGKth3yl~> (accessed Feb. 21, 2022).

## 8 ANEXOS

### Anexo A. Datasheet de la batería LIR18650



#### 8.1 Electrical Performances

Items	Test procedure	Requirements
8.1.1 Nominal Voltage	The average value of the working voltage during the whole discharge process.	3.7V
8.1.2 Discharge Performance	The discharge capacity of the cell, measured with 1.3 A down to 3.0V within 1 hour after a completed charge.	≥114min
8.1.3 Capacity Retention	After 28 days storage at 25±5℃, after having been completely charged and discharged at 0.52A, discharge to 3.0V, the residual capacity is above 80%	Capacity≥2080mAh
8.1.4 Cycle Life	After 299 cycles at 100% DOD. Charge and discharge at 1.3A, and plus 1 day, measured under 0.52A charge and discharge, the residual discharge capacity is above 80% of initial capacity (Cycle life may be determined by conditions of charging, discharging, operating temperature and/or storage.)	300 cycles the residual capacity ≥2050mAh
8.1.5 Storage	(Within 3 months after manufactured) The cells is charged with 1.3A to 40-50% capacity and stored at ambient temperature 25±5℃, 65±20%RH for 12 months. After the 12 months storage period the cell is fully charged and discharged to 3.0V with 0.52A	Discharge time≥4h

#### 8.3 Environmental tests

Items	Test procedure	Requirements
8.3.1 High temperature performance	The fully charged cell is put at 55±2℃ for 2 hours and then discharged to 3.0V at 1.3A.	Capacity≥2080mAh
8.3.2 Low temperature performance	The fully charged cell is placed during 16-24 hours at -20±2℃ and then discharge to 2.75V at 0.52A.	Capacity≥1800mAh
8.3.3 Anti-vibration	The fully charged cell is fixed on a platform and vibrated in the X, Y and Z directions for 30minutes at the speed 10ct/min Frequency: 10~30Hz, Vibration amplitude 0.38mm. Frequency: 30~55Hz, Vibration amplitude 0.19mm.	No deformation should be visible. Not leak, smoke and/or explode. Voltage should be not less than 3.6V.
8.3.4 Drop Test	The fully charged cell is dropped from a height of 1m onto a 15~20mm hard board in X, Y and Z directions once for all axis. Then the cell is discharged at 1.3A to 3.0V followed by 3 or more cycles with the standard charge rate and a discharge at 1.3A.	No fire, no explosion. Discharge Time≥102min

## Anexo B. Datasheet de la batería lifepo4



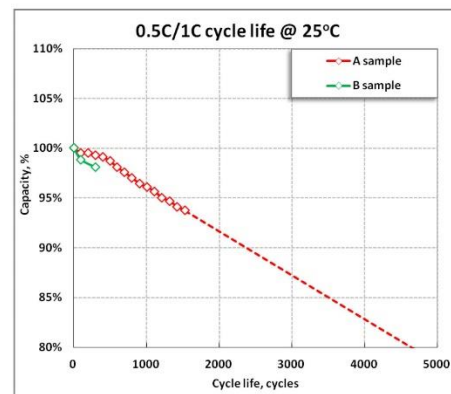
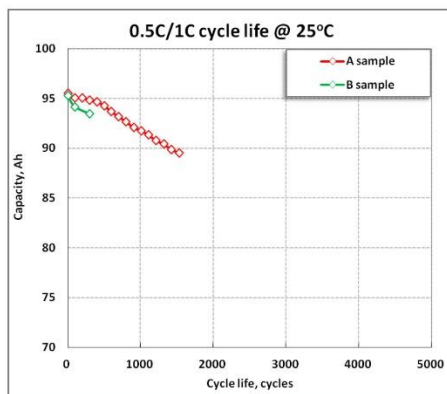
Technical Specifications	
Model	LBS-12-100
Configuration	4x 3.2V / 100Ah cells
Type	Lithium Iron Phosphate (LiFePO4)
Nominal Capacity	100Ah
Nominal Voltage	12.8V
Lifespan	2,000 cycles (80% DOD)
Charging Voltage	13.8V – 14.6V
Max Charge Current	100A
Max Discharge Current	250A
Operating Temperature	0° – 45°C
Weight	15.7kg
Dimensions (L x W x H)	320 x 160 x 333 mm

## Anexo C. Datasheet de la batería BMW I3



### Cycle life

@ 0.5C/1C, 25°C, SOC0~100%



※ RPT condition @ 25°C

Charge: 1/3C  $V_{max}$  CCCV charge, 1/50C cut off rest 30 min  
 Discharge: 1/3C CC discharge  $V_{min}$  cut off rest 60 min

Sample	Vol. range	Estimated life at EOL (80%)
A sample	4.15~2.7 V	4,600 cycles
B sample	4.15~2.7 V	↑