

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

**Dr. Alejandro Rojas N.**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de:

**Ingeniero Civil Electrónico**

Control del consumo de energía para compuerta del  
microcanal.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:  
Dr. Alejandro Rojas Norman.

# Control del consumo de energía para compuerta del microcanal

Gustavo Andrés Vera Vidal

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Enero, 2016

# Resumen

Esta memoria de título busca dar solución a la problemática que significa controlar el consumo de un banco de baterías energizadas por paneles solares, de tal forma de poder tener una estimación en línea del estado de carga de las mismas y controlar dicho proceso mediante actuadores. El SoC (estado de carga, en sus siglas en inglés State of Charge) se define como la energía expresada como un porcentaje de la capacidad nominal, que aún está disponible para ser utilizada, la cual depende de muchas variables tales como: temperatura, tasas de corriente de carga/descarga, tiempo de uso, histéresis y auto descarga. En particular y con el fin de acotar la problemática, esta investigación se centra en el estudio del estado de carga de un banco de baterías para un sistema fotovoltaico, las cuales se encuentran instaladas en el Laboratorio de Control de Procesos del Departamento de Ingeniería Eléctrica donde energizan un par sensor/actuador que controlan el microcanal piloto también instalado en dicho laboratorio.

Para dar solución a la problemática señalada en el párrafo anterior se procedió al desarrollo de un algoritmo de estimación, para lo cual fue necesario el estudio del principio de funcionamiento y tecnología de las baterías en cuestión, sumado a sus enfoques y el modelo que represente el comportamiento del acumulador de manera adecuada. Así mismo parte de la solución implicó el desarrollo de un sistema de adquisición de datos basado en el microcontrolador Arduino con el cual se pudo someter a las baterías a cargar y descargar de tal manera de obtener y generar información necesaria para derivar un modelo de baterías que resulte sencillo de implementar. Finalmente se determinó como solución el abordaje de un modelo mixto el cual incluye el modelo de batería, que junto con el método de la integral de la corriente con el cual se capturan las ventajas de ambos métodos.

En base al modelo y método de estimación desarrollado, fue posible controlar el estado de carga de una batería que alimenta la compuerta del microcanal, para lo cual se empleó un relé capaz de intervenir el circuito de paneles a batería, y otro relé desde las baterías al motor. De esta manera se pudo obtener un control del microcanal con la compuerta accionada por el motor paso a paso, y monitorear en línea y en todo momento el SoC de las baterías, de tal forma de poder controlarlo mediante los relés instalados. De esta manera se pudo programar en un PLC, el consumo de energía de las baterías sin dejar de lado el control del nivel del microcanal.

## Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a todos quienes me apoyaron en la realización de esta memoria de Título, partiendo por mi familia, todo este logro va dedicado para ellos.

Agradecer a mi polola Julia Solange quien fue un pilar fundamental en los momentos más tensos y difíciles, siempre tuvo una palabra de aliento, confió en mi hasta el final.

Agradecer a todos mis amigos del Colegio Inmaculada Concepción quienes fueron un buen apoyo para distraerme en los momentos adecuados, tampoco puedo olvidar a mis compañeros electrónicos con quienes siempre me dieron una manito de ayuda cuando lo necesitaba, al glorioso CSD Electrotintos , y a todos quienes compartimos noches de estudio y laboratorio.

Agradecer al Profe Espinoza por el préstamo de los valiosos sensores de corriente, que fue de mucha ayuda en el desarrollo de la memoria, a Don Pato quien me ayudó siempre en los temas técnicos del conexionado.

Agradecer a los alumnos de Doctorado de Universidad de Chile, Claudio Burgos, Aramis Perez quienes me ayudaron a enfocar la memoria desde otra perspectiva.

Agradecer enormemente a mi profesor Patrocinante Alejandro Rojas quien me apoyó y depositó su confianza y por ayudarme con mucha disposición cuando requería molestarlo por alguna pregunta.

A todos ustedes que siempre estuvieron conmigo apoyandome, Muchas Gracias.

# Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS .....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	VI
ABREVIACIONES.....	IX
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL .....	10
1.2 TRABAJOS PREVIOS .....	10
1.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO, MODELACIÓN, Y ESTIMACIÓN DE ESTADO DE CARGA DE BATERÍAS .....	10
1.2.2 CONTROL DEL MICROCANAL .....	15
1.2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	15
1.2.4 HARDWARE Y SOFTWARE UTILIZADO .....	16
1.2.5 <i>Discusión</i> .....	17
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	18
1.4 OBJETIVOS.....	18
1.4.1 <i>Objetivo General</i> .....	18
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	18
1.4.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	18
1.4.5 TEMARIO Y METODOLOGÍA .....	19
<b>CAPÍTULO 2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO, MODELAMIENTO Y MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE CARGA DE BATERÍAS DE PB-ÁCIDO. ....</b>	<b>20</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	20
2.2 DESCRIPCIÓN DE ACUMULADOR REVERSIBLE .....	20
2.3 PRINCIPIO QUÍMICO DE FUNCIONAMIENTO.....	21
2.3.1 <i>Sustancia activa del polo negativo</i> .....	21
2.3.2 <i>Sustancia activa del electrólito</i> .....	22
2.3.3 <i>Sustancia activa del polo positivo</i> .....	22
2.4 ACUMULADOR PLOMO ÁCIDO.....	22
2.5 CONCEPTOS ASOCIADOS A ACUMULADORES DE ENERGÍA .....	23
2.5.1 <i>Magnitudes directamente medibles</i> .....	24
2.5.1.1 <i>Tensión</i> .....	24
2.5.1.2 <i>Tensión de circuito abierto</i> .....	24
2.5.1.3 <i>Corriente</i> .....	29
2.5.1.4 <i>Temperatura</i> .....	29
2.5.1.5 <i>Densidad del electrólito</i> .....	30
2.6 <i>Magnitudes de baterías obtenidas mediante pruebas experimentales</i> .....	30
2.6.1 <i>Capacidad</i> .....	30
2.6.2 <i>Resistencia interna</i> .....	34
2.7 <i>Magnitudes de baterías que deben ser estimados</i> .....	35
2.7.1 <i>Estado de carga (SoC)</i> .....	35
2.7.2 <i>Estado de salud (SoH)</i> .....	36
2.8 ENFOQUES PARA LA MODELACIÓN DE BATERÍAS.....	37
2.8.1 MODELOS ELECTROQUÍMICOS.....	37
2.8.2 MODELOS CIRCUITAL EN CORRIENTE CONTINUA.....	38
2.8.3 MODELO CIRCUITAL EN CORRIENTE ALTERNA .....	39
2.8.4 MODELO TIPO CAJA NEGRA .....	39
2.8.5 MODELOS ESTOCÁSTICOS .....	40
2.8.6 MODELOS HEURÍSTICOS .....	40
2.9 MODELOS FENOMENOLÓGICOS PARA ACUMULADORES DE ENERGÍA .....	41
2.9.1 MODELO DE THEVENIN CAPA SIMPLE .....	41
2.9.2 MODELO DE THEVENIN DOBLE CAPA .....	43
2.9.3 MODELO DE THEVENIN RUNTIME .....	44
2.9.4 MODELO DE SHEPHERD.....	45
2.9.5 MODELO DE COPETTI Y CHENLO.....	46

2.9.6 DISCUSIÓN .....	49
2.10 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL SoC EN BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO .....	49
2.10.1 MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DEL ELECTROLITO .....	49
2.10.2 MÉTODO DE VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO .....	50
2.10.3 MÉTODO DE LA INTEGRAL DE LA CORRIENTE .....	51
2.10.4 MÉTODO DE LA IMPEDANCIA ESPECTROSCÓPICA .....	52
2.10.5 MÉTODO DE RESISTENCIA INTERNA .....	53
2.10.6 FILTRO DE KALMAN (KF) PARA ESTIMACIÓN DE SoC .....	54
2.10.7 MODELACIÓN DIFUSA PARA ESTIMACIÓN DE SoC.....	55
2.11 MÉTODO PROPUESTO PARA LA ESTIMACIÓN DE SoC .....	56
<b>CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DEL TRABAJO .....</b>	<b>59</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	59
3.2 TRABAJOS PREVIOS .....	59
3.3 HARDWARE INSTALADO .....	65
3.3.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	66
3.3.2 SENSOR DE CORRIENTE.....	66
3.3.3 SENSORES DE VOLTAJE.....	67
3.3.4 MICROCONTROLADOR .....	68
3.3.5 MODULO SD SHIELD DATA LOGGER.....	68
3.4 ESQUEMÁTICO PRUEBAS DE RELAJACIÓN DE LA BATERÍA .....	69
3.5 ESQUEMA CONEXIONADO ESTIMACIÓN EN LÍNEA DE ESTADO DE CARGA .....	69
3.6 COMUNICACIÓN ARDUINO-SIMULINK-PLC.....	70
3.7 P&ID ESTIMACIÓN DE SoC .....	71
3.8 P&ID PLANTA PILOTO MICROCANAL .....	71
3.9 MODELO DE BATERÍA .....	72
3.9.1 CURVA Voc v/s SoC .....	74
3.9.2 RESISTENCIA SERIE .....	74
3.9.3 PARÁMETROS CONSTANTES DE TIEMPO RC.....	75
3.10 MODELACIÓN Y CONTROL MICROCANAL.....	76
3.10.1 MODELO PRIMER ORDEN CON RETARDO DE LA PLANTA.....	76
<b>CAPÍTULO 4 SIMULACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>80</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	80
4.2 COMPORTAMIENTO DE LA BATERÍA Y FUNCIONAMIENTO DEL REGULADOR DE CARGA .....	80
4.3 RESULTADOS PRUEBAS DE RELAJACIÓN Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS .....	84
4.4 CURVA SoC vs Voc .....	86
4.5 SIMULACIÓN MODELO MIXTO.....	87
4.6 SIMULACIÓN CONTROLADOR PI .....	89
4.7 ESTIMACIÓN EN LÍNEA DEL SoC CON CONTROL DEL MICROCANAL.....	90
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>94</b>
5.1 SUMARIO.....	94
5.2 CONCLUSIONES .....	94
5.3 TRABAJO FUTURO .....	95
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>97</b>

## Lista de Tablas

Tabla 2.1. Características norma europea y norteamericana.....	31
Tabla 2.2. Enfoques para la modelación de acumuladores de energía.....	37
Tabla 2.3 resumen método de medición de la densidad del electrolito.....	50
Tabla 2.4 Resumen método de voltaje de circuito abierto.....	51
Tabla 2.5: Resumen método de la integral de la corriente.....	52
Tabla 2.6 Resumen método de la impedancia espectroscópica.....	53
Tabla 2.7 Resumen método de la Resistencia interna.....	54
Tabla 2.8 Resumen método filtro de Kalman.....	55
Tabla 2.9 Resumen método de modelación difusa.....	56
Tabla 3.1. Especificaciones Motor paso a paso AMCI SMD23E.....	63
Tabla 3.2. Consumo motor paso a paso AMCI SMD23E.....	63
Tabla 3.3 Consumo de cargas en una hora.....	64
Tabla 3.4 Parámetros Compuerta accionada por motor.....	65
Tabla 3.45 Parámetros de la planta continua.....	77
Tabla 4.1 Valores de los parámetros del modelo de Thevenin de capa doble.....	87
Tabla 4.2 Kc y Ti Método Lazo Cerrado.....	89

## Lista de Figuras

Fig. 2.1 Diagrama celda electroquímica.....	21
Fig. 2.2 Batería de plomo ácido.....	23
Fig. 2.3 Influencia de la histéresis en la curva SoC vs Voc.....	25
Fig. 2.3 Test rápido para la obtención de la curva Soc vs Voc.....	26
Fig. 2.4 Comparación método propuesto.....	26
Fig. 2.5 Comparación SoC vs Voc acumulador plomo ácido, ion litio.....	27
Fig. 2.6 Prueba de relajación con reposos de 48[ <i>min</i> ].....	27
Fig. 2.7 Prueba de relajación con reposos de 60[ <i>min</i> ].....	28
Fig. 2.8 Relación entre densidad del electrolito y SoC para baterías de plomo ácido.....	31
Fig. 2.9 Prueba de Capacidad para acumulador ion-litio polímero en función de la corriente.....	32
Fig. 2.10 Prueba de capacidad para acumulador ion-litio polímero.....	32
Fig. 2.11 Prueba de capacidad para acumulador ion-litio polímero.....	33
Fig. 2.12 Formación de resistencia interna de un acumulador.....	34
Fig. 2.13 Prueba de capacidad a distintas corrientes.....	36
Fig. 2.14 Modelo eléctrico en AC.....	39
Fig. 2.15 Modelo de Thevenin.....	42
Fig. 2.16 Variante del modelo de Thevenin.....	43
Fig. 2.17 Modelo de Thevenin de doble capa.....	45
Fig. 2.18 Modelo de Thevenin run time.....	45
Fig. 2.19 Contribución parte exponencial modelo Shepherd.....	46
Fig. 2.20 Esquemático modelo Coppeti y Chenlo.....	47
Fig. 2.21 Representación resistencia Óhmica y de fuga.....	54
Fig. 2.22 Algoritmo mixto de estimación de SoC.....	57
Fig. 2.23 Estimación por el método de Integral de la corriente.....	58
Fig. 3.1 Sistema fotovoltaico.....	60
Fig. 3.2 Regulador de carga.....	60
Fig. 3.3 Batería utilizada.....	61

Fig. 3.4 Elevador de tensión utilizado.....	62
Fig. 3.5 Motor paso a paso AMCI SMD23E.....	62
Fig. 3.6 Sensor de Corriente LEM 55-P.....	67
Fig. 3.7 Circuito de Sensor LEM 55-P de corriente de efecto Hall.....	67
Fig. 3.8 Sensor de Voltaje.....	68
Fig. 3.9 Arduino usado como Tarjeta de adquisición de datos.....	68
Fig. 3.10 Modulo Data Logger.....	68
Fig. 3.11 Esquemático de conexión para obtener los datos de descarga de la batería.....	69
Fig. 3.12 Esquema conexasión Estimación en línea de Estado Carga.....	70
Fig.3.13 Esquema comunicación Sensores- Arduino-Simulink-OPC-PLC.....	70
Fig. 3.14 P&ID estimación de SoC .....	71
Fig. 3.15 P&ID planta piloto microcanal .....	71
Fig. 3.16 Modelo de Thevenin .....	72
Fig. 3.17 Modelo de Thevenin sin considerar tiempo de vida útil del banco de baterías.....	73
Fig. 4.1 Algoritmo de carga de tres etapas.....	81
Fig. 4.2 Evolución Voltaje bornes batería .....	81
Fig. 4.3.a Comportamiento Voltaje Bornes batería.....	82
Fig. 4.3.b Comportamiento Consumo Motor .....	
Fig. 4.4 Corriente proveniente Panel solar.....	83
Fig. 4.5 Resultados Pruebas de relajación a) Voltaje batería. b) Corriente de descarga .....	84
Fig. 4.6 Resultados Pruebas de relajación a) Voltaje batería. b) Corriente de descarga .....	85
Fig. 4.7 Aproximación necesaria para identificar parámetros.....	86
Fig. 4.8 Curva aproximada Voc vs Soc .....	86
Fig. 4.9 Simulink Discreto .....	88
Fig. 4.10: Voltaje Entrada real vs voltaje estimado por modelo de Thevenin Capa doble .....	88
Fig. 4.11: Evolución SoC estimado por el método .....	89
Fig. 4.12: Simulación Controlador PI con planta de primer orden con retardo .....	90
Fig. 4.13: Esquema Control Consumo de energía Compuerta Microcanal .....	91
Fig. 4.14: (a) Control Microcanal, (b) Movimiento Compuerta, (c) Corriente motor, .....	91
Figura 4.15.a : a) Control Nivel Microcanal b) Movimiento Compuerta c) Corriente motor .....	92
Figura 4.15.b a) Corriente panel b) SoC c) Voltaje Batería .....	93

# Abreviaciones

## Mayúsculas

S.O.H	:state of health (estado de salud)
S.O.C	:state of charge (estado de carga)
L.A.	: lazo abierto.
L.C.	: lazo cerrado.
DoD	: depth of discharge (profundidad de descarga)
P.I	: Proporcional Integrativo

## Minúsculas

c.c.	: corriente continua (en Inglés es d.c.).
c.a.	: corriente alterna (en Inglés es a.c.).



## Capítulo 1 Introducción

---

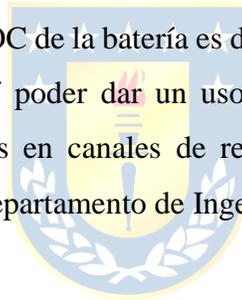
### 1.1 Introducción General

El consumo de energía eléctrica abarca en todo sentido el desarrollo del ser humano. Desde que se inventó la bombilla hasta los tiempos recientes, la electricidad ha marcado la pauta del auge industrial. Su óptimo uso y rendimiento es un tema a destacar en la evolución de la tecnología.

Gracias a la tecnología de hoy en día se ha llegado a una alternativa muy útil, que son los sistemas fotovoltaicos, estos generan energía eléctrica a partir de la radiación proveniente del sol que en muchos casos será almacenada en baterías y posteriormente se puede energizar una amplia variedad de componentes.

Con ayuda de la creciente evolución de los microcontroladores se analiza la opción de un sistema de adquisición de datos, para lograr la estimación del SOC (estado de carga) de un banco de baterías de plomo ácido.

Por ende, el conocimiento del SOC de la batería es de mucha importancia para tener el control de este elemento electroquímico, y así poder dar un uso correcto, para prolongar su vida útil y optimizar el uso en compuertas usadas en canales de regadío como el que está instalado en el Laboratorio de Control ubicado en el Departamento de Ingeniería eléctrica.



### 1.2 Trabajos Previos

El material estudiado se divide: Principio de Funcionamiento y Modelación de baterías, Métodos de estimación de estado de carga de baterías, control del microcanal, sistema fotovoltaico, y utilización del hardware y software instalado.

#### 1.2.1 Principio de Funcionamiento, modelación, y estimación de estado de carga de baterías.

♣ Dr. Leonardo Palma “*Apuntes de clases, asignatura fuentes de energía alternativa*”.. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción [1].

Los apuntes de este ramo son de principal importancia en este proyecto para entender conceptos básicos de almacenamiento de energía para todo sistema con fuente de energía alternativa, los apuntes especifican desde los tipos de baterías que se pueden utilizar hasta ejemplos básicos de los ciclos de carga y descarga de una batería.

En estos apuntes se encuentran las ecuaciones que modelan la carga y descarga de baterías, así como detallan las características de la generación fotovoltaica, todo esto ayudará a dar un mayor análisis al uso de la batería que alimenta el motor paso a paso que acciona la compuerta del microcanal

- ♣ D. Linden y T.B Reddy, *Handbook of batteries* Third edition, McGraw-Hill, 2002 [2]

Este libro ayuda a entender el principio de funcionamiento de los acumuladores de energía, se describe lo que se define como acumulador reversible, junto con sus principios químicos de funcionamiento, sumado a las múltiples tecnologías de baterías como níquel cadmio, níquel metal hidruro, batería alcalina recargable, de litio, y lo más importante para nuestro estudio, todo sobre la tecnología de las baterías de plomo ácido.

- ♣ D.G. Murillo, “Modelamiento y análisis de sistemas fotovoltaicos” Tesis doctoral de la universidad politécnica de Cataluña, Barcelona, España 2003. [3]

Tesis doctoral que analiza la problemática de las instalaciones fotovoltaicas desde su diseño hasta su puesta en marcha y posterior explotación. Se trabajan en Matlab/Simulink debido a la gran potencia y flexibilidad que ofrece. Se detallan los modelos de los dispositivos involucrados en los sistemas fotovoltaicos, y se aborda la problemática de la integración de los dispositivos en sistemas fotovoltaicos.

- ♣ M. Sueldo “Modelado y ensayo de Baterías: Validación de simulaciones de carga y descarga”, Cartagena, noviembre 2009, Ingeniería Técnica Industrial, Universidad politécnica de Cartagena. [4]

Este proyecto de tesis presenta un modelo que representa a la batería como una red eléctrica de manera que el funcionamiento sea de fácil asimilación para un ingeniero eléctrico, el modelo es simulado con Matlab con la herramienta simulink, pensada especialmente para simular procesos dinámicos. Finalmente, con este modelo se simula el comportamiento de una batería en diferentes condiciones evitando los costosos test de laboratorio.

- ♣ S.Abu-Sharkh y D. Doerffel, “Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries”, *Journal of power Sources*, p 266-274 2004. [5]

Este trabajo realiza pruebas de ensayo para determinar la curva SoC v/s Voc, estas pruebas serán de mucha utilidad ya que serán las empleadas para descargar y cargar la batería y así poder determinar el modelo y diseñar el estimador de estado de carga de la batería.

- ♣ C.Burgos “Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman” Tesis para optar al grado de Magister en ciencias de la ingeniería mención eléctrica. Santiago, Universidad de Chile, 2013. [6]

Este trabajo se centra en el estudio del estado de carga para acumuladores de energía del tipo plomo ácido. Para ello se tomó en consideración, contar con un buen modelo que represente el comportamiento de la batería de manera adecuada, sumado a un buen algoritmo para realizar la estimación del algoritmo. También se ahonda en el desarrollo de un sistema experimental, y lo novedoso es que la metodología utilizada es la lógica difusa.

- ♣ A.Shafiei, A. Momeni y S. Williamson, “Battery modeling approaches and management techniques for Plug-in Hybrid Electric Vehicles”, *Vehicle power and propulsión Conference (VPPC), 2011 IEEE*, pp 1-5 2011.[7]

Este paper explica los modelos heurísticos más comunes que corresponden a la ecuación Peukert. Esta ecuación expresa la relación no lineal existente entre la capacidad de la batería y la tasa de corriente de descarga. Se ahonda en el método de la impedancia espectroscópica que brinda información relevante del estado de carga de la batería.

Se concluye que este método tiene que las curvas de impedancia son fuertemente dependientes de la temperatura, por lo cual solo sería utilizable en aplicaciones a temperatura constante.

- ♣ B. Severino,” Modelación de un sistema fotovoltaico y un banco de baterías de plomo ácido como elementos de una micro-red”, Tesis para optar al grado de ingeniero civil electricista de la Universidad de Chile, Santiago Chile 2011. [8]

Esta tesis considera la generación y las cargas como un sub-sistema: una microrred, se desarrolla una microrred aislada en el poblado de Huatacondo, contando con la modelación de dos de las unidades que conforman la microrred aislada, y que son elementos usuales, la unidad de generación fotovoltaica y la unidad de banco de baterías de plomo ácido. Se propone un estimador del estado de carga de las baterías de plomo ácido basado en el modelo no lineal de Copetti y en la metodología de estimación de estados basado en el filtro extendido de Kalman.

- ♣ F.Codecá , S.M Savaresi y G.Rizzoni, “On battery state of charge estimation: A new mixed algorithm” *Control applications, 2008. CCA 2008. IEEE International Conference on*, pp 102-107,2008.[9]

Este paper se presenta un algoritmo para determinar el estado de carga de una celda ion litio,

este algoritmo combina dos métodos, uno de ellos es el de la integral de la corriente, mientras que el segundo corresponde a una modelación fenomenológica del acumulador. El modelo de baterías que se utiliza es el de Thevenin de Capa Doble, este método mixto de estimador mezcla las mejores características de la integral de la corriente y el modelo aplicado.

♣ C. Burgos “Diseño del estimador de estado de carga (SoC) para el auto solar Eolian 2 para WSC”. Trabajo para el curso EL67B, del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Chile, Santiago , Chile ,2011.[10]

Este trabajo se centra en el estudio del estado de carga (SoC) para el banco de baterías del auto solar Eolian 2. Se da cuenta de un estimador encontrado que cumple con los requerimientos de tener buena performance, bajo costo computacional, baja data experimental para su calibración, el cual es del tipo mixto, que utiliza un modelo fenomenológico del banco de baterías, el cual es usado como la planta en un algoritmo de control de lazo cerrado, con un controlador del tipo integral.

Se demuestra que tiene un buen desempeño y logra ser bastante inmune frente a lecturas de corriente, el modelo de batería que se utilizó es el modelo de Thevenin, el más utilizado en la actualidad para caracterizar bancos de baterías.

♣ S. Piller, M Perrin y A. Jossen, “Methods for state of charge determination and their applications”, *Journal of power sources*, pp 113-120,2001. [11]

Este trabajo ahonda en un método para estimar el SoC, en el cual se basa en la medición de la densidad del electrolito, se hace hincapié que solo es aplicable a baterías de plomo-ácido del tipo VRLA (valve regulated lead acid). También se ilustra el análisis de la técnica de filtro de Kalman para la determinación del SoC de la batería de plomo-ácido, se presentan algunos resultados acerca de estos cálculos.

♣ C.- F Chiasserini y R. Rao, “Energy efficient battery management”, *IEEE Journal on selected Areas in Communications*, vol 19 n°7, p. 1235-1245, 2001.[12]

En este paper se propone un modelo estocástico para representar los efectos de recuperación del acumulador, cuando a este se le aplica un pulso de descarga. Este modelo es igualado al modelo electroquímico y se utiliza para investigar las técnicas de gestión de la batería que pueden mejorar la eficiencia energética en los dispositivos de comunicación de radio.

Los resultados indican que las técnicas de la gestión de la batería propuestas mejoran el rendimiento del sistema sin importar que parámetros se eligen para caracterizar el comportamiento de las celdas.

♣ J. Kim y B. H Cho, “State of Charge Estimation and State-of-health Prediction of a Li-ion degraded Battery Base don an EKF Combined with a per unit System”. *Vehicular Techonlogy, IEEE* [13]

En este paper se presenta un modelo simplificado de los procesos electroquímicos que tienen lugar dentro de la batería. Su principal característica es que tiene una representación en base a elementos eléctricos, y se muestra un estimador del estado de carga basado en el filtro extendido de Kalman.

♣ F. Sun, R Xiong, H. H, W. Li y J. E.E Aussems, “Model-based dynamic multiparameter method for peak power estimation of lithium-ion batteries”, *Applied Energy*. n°161, p 1400-1411,2006.[14]

En este paper se presenta una variante al modelo de Thevenin el cual presenta dos resistencias internas, una para carga y otra para descarga en baterías de Ion-Litio, este modelo presenta una evaluación dinámica de la potencia máxima desarrollada por las baterías, se utilizan métodos de horizonte de predicción y se enfoca en mejorar la credibilidad de la evaluación de los máximos de potencia en los acumuladores bajo diferentes condiciones de operación.

♣ L. Gao, S. Liu y R. A. Dougal, “Dynamic lithium-ion battery model for system simulation”. *Components and packaging Technologies, IEEE Transactions on*, vol. 25,pp 495-505, 2002 [15]

En este paper se presenta un modelo dinámico de baterías de ion-litio que son adecuados para la creación de prototipos virtuales de los sistemas que funcionan en acumuladores portátiles.

El modelo se puede modificar fácilmente y adaptarse a los datos de diferentes tipos de baterías y se puede ampliar a rangos dinámicos amplios y a diferentes temperaturas.

♣ M. Chen y G. A. Rincon-Mora “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance” *Energy Conversion ,IEEE Transactions on*, vol.21, pp 504-511, 2006[16]

Este trabajo se propone un modelo de batería eléctrica con el objetivo que sea precisa, intuitiva, completa e implementado en un software Cadence, este modelo tiene en cuenta todas las características dinámicas de la batería, la tensión de circuito abierto no lineal, corriente, temperatura y numero de ciclos, además de la capacidad en función del tiempo de almacenamiento a la respuesta transitoria.

- ♣ H Zhang y M.-Y. Chow. “ On-line PHEV battery hysteresis effect dynamics modeling”, IECON 2010-36th *annual conference on IEEE Industrial Electronics Society* [17]

Este paper se muestra como se determinan las envolventes de las curvas de histéresis propias de un acumulador, se propone descargar la batería mediante periodos de descarga y reposo.

Este método proporciona un efectivo modelo de efecto de relajación de la batería, de esta forma se puede determinar el voltaje de circuito abierto a partir de mediciones directa en el voltaje y la corriente de carga de los terminales de la batería.

### 1.2.2 Control del microcanal

- ♣ Bruno Moraga Ramírez, “Modelación de Microcanal para control y estimación”, Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico, Marzo 2014, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción [18] .

Este trabajo se aborda la modelación de canales de regadío con énfasis en los procesos de identificación para la obtención de los parámetros que rigen el comportamiento de este tipo de sistemas. Se presentan distintas estrategias para modelar canales de regadío; en particular la utilización de modelos de primer orden para modelar estos canales como si se tratasen de estanques acoplados cuyas dinámicas son conocidas y dependientes de los flujos de entrada y salida correspondiente para cada piscina.

Es importante saber modelar este tipo de sistemas ya que para la implementación de un controlador predictivo se requiere conocer las perturbaciones que afectan a la planta y a la vez saber el modelo de esta. Este trabajo proporciona resultados útiles a la hora de implementar un control del microcanal con modelos de primer orden con retardo que representan fielmente las dinámicas presentes en canales de regadío a pesar de las características no lineales de la planta.

### 1.2.3 Sistema Fotovoltaico

- ♣ Nolbert Cuevas Alarcón, “Sistema de generación eléctrica a través de paneles solares para alimentar sensor/transmisor de nivel inalámbrico”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad

de Concepción [19]

En este trabajo se realizó la alimentación energética de un sensor/transmisor de nivel ubicado en un microcanal de regadío, por medio de un sistema de generación fotovoltaica que permite que el sistema sea autónomo e independiente de la red eléctrica. Fueron necesarios conocer los datos de radiación y ubicación geográfica para el correcto dimensionamiento del sistema

Los resultados obtenidos en este proyecto indican que el sistema de alimentación está sobredimensionado para el consumo que produce el monitoreo, por lo que es posible usar este mismo sistema de alimentación para energizar el motor paso a paso. Además, proporciona información útil con respecto a la carga de las baterías que serán utilizadas para alimentar el motor paso a paso que accionará la compuerta, con lo que se podrá calcular la razón de carga y descarga al utilizar el actuador.

### 1.2.4 Hardware y software utilizado

- ♣ Rodrigo Fernández Briones, “Montaje y Control de Compuerta accionada por Motor paso a paso en Microcanal”, Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico, diciembre 2014, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción [20].

En este trabajo se implementó y controló una compuerta automática accionada por un motor de paso a paso en una planta microcanal. Se utilizó un motor paso a paso AMCI SMD23E. Se caracterizó la compuerta a fin de implementar un lazo de control de nivel para una piscina del microcanal. Las pruebas realizadas demostraron que la compuerta implementada es capaz de realizar el control de nivel de una piscina, realizando un seguimiento de la referencia, sin sobrepaso y oscilación, además de soportar la acción de una perturbación.

Este trabajo aporta los fundamentos de la utilización del motor paso a paso controlado mediante el software RsLogix, el cual será usado para realizar un programa que pueda optimizar el uso de las baterías con las que se quieren alimentar el motor paso a paso.

- ♣ *Manual #:940-0S133, SMD23E AMCI, 2013 [21].*

En este manual se encuentra la información necesaria sobre el motor paso a paso SMD23E, el cual es utilizado como actuador para la compuerta vertical que se desea implementar.

El manual proporciona la información necesaria para conocer los modos de operación del motor; modo de configuración y modo comando con los cuales ayuda a entender mejor el uso del controlador integrado y del encoder dentro del motor paso a paso.

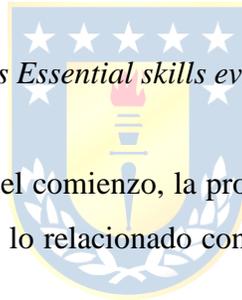
- ♣ *Manual de referencia Números de catálogo 1756-L1x, 1756-L5x, 1756-L6x, 1768-L4x, 1769-L30, 1769-L31, 1769-L32C, 1769-L32E, 1769-L35CR, 1769-L35E, 1789-L60, 1794-L34, 20D, Rockwell Automation, Julio 2013 [22].*

El manual de referencia tiene la información de todos los comandos a utilizar para programar un controlador Allen-Bradley con sus respectivos ejemplos.

Este manual ayuda a detallar los elementos que tiene el software con el cual se trabajará en el control del motor SMD23E. Contiene información detallada y ejemplos básicos, los cuales ayudan en la implementación de algoritmos en el software.

- ♣ J.Baichtal *Arduino for Beginners Essential skills every maker needs*, Indiana USA 2014 [23].

En este manual se enseña desde el comienzo, la programación en arduino y todo su entorno, en este trabajo se requiere conocer todo lo relacionado con su conversor análogo digital y forma de adquisición de datos.



### 1.2.5 Discusión

Como se revisó en la bibliografía anterior, es posible optimizar el uso de las baterías del sistema fotovoltaico, conociendo en cada momento el SOC de las baterías, para ello se necesita estudiar, modelar, y simular el comportamiento de las baterías frente a las descargas que produce el motor paso a paso que funciona como compuerta del microcanal.

Al implementar un sistema de adquisición de datos, en donde se almacene el voltaje en circuito abierto y corriente de carga y descarga, es posible determinar el modelo de las baterías mediante métodos de estimación de carga y así poder conocer en todo momento el SoC de las baterías.

Este modelo se programará en Simulink y mediante comunicación serial por un servidor OPC a RsLogix5000 (software de los controladores Allen-Bradley) se obtendrán los datos, para así posteriormente tener el SOC en línea. El estado de carga de la batería es de suma importancia en aplicaciones donde el acumulador está sometido permanentemente a situaciones de carga y/o

descarga, como en este caso, que será alimentado por paneles solares y descargados por un motor paso a paso. Para ello se necesita un buen modelo que represente el comportamiento de la batería de manera adecuada y un buen algoritmo que sea utilizado para realizar la estimación.

### 1.3 Hipótesis de Trabajo

Es posible que un PLC Allen Bradley reciba la información en cada momento del estado de carga de batería, sumado a la capacidad de poder controlar un actuador en este caso relés, lograría un control eficiente del SOC de la batería.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo General

Diseñar un estimador del estado carga de las baterías que alimentan el motor paso a paso que acciona la compuerta del microcanal, de manera de poder controlar su carga y descarga mediante un PLC Allen-Bradley.



#### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el Funcionamiento y modelación de las baterías.
- Estudiar y posteriormente utilizar un método de estimación de estado de carga de la batería.
- Diseñar un sistema de adquisición de datos.
- Realizar un control del consumo de energía en la batería, de modo de poder controlar la carga y descarga de una batería instalada en un sistema fotovoltaico.

#### 1.4.3 Alcances y Limitaciones

El estudio realizado para poder implementar un estimador de estado de carga de batería se basa en algoritmos que se encuentran en la literatura estándar. Antes de la implementación en el PLC los modelos se verificarán y simularán en Matlab.

El sistema de adquisición se basará en el hardware Arduino, y se utilizará el sistema fotovoltaico previamente instalado.

Las pruebas se realizarán de día, para poder utilizar de buena manera el sistema fotovoltaico.

El aporte en concreto que se hace con esta Memoria de Título es la implementación de un

estimador de estado de carga de una batería utilizada en un sistema fotovoltaico, que sirva para poder controlar el uso de la batería y mejorar su rendimiento.

### **1.4.5 Temario y Metodología**

En el primer capítulo se colocan las bases y objetivos del trabajo, en el capítulo 2 se ponen el principio de funcionamiento y tecnología de los acumuladores de plomo ácido, se estudian las principales magnitudes asociadas a los acumuladores de energía, para posteriormente conocer los principales enfoques utilizados para realizar la modelación de este elemento electroquímico. También se aborda el tema de la estimación del estado de carga en acumuladores de energía, se ven diversas técnicas utilizadas en la actualidad para determinar este indicador. El capítulo 3 se centra en la implementación del trabajo que incluye el sistema de adquisición de datos. En el capítulo 4 se obtienen los resultados experimentales de la descarga de la batería para determinar el modelo, también la evolución del SoC de las baterías cuando se está controlando el nivel con la compuerta accionada por el motor paso a paso.



## Capítulo 2 Principio de Funcionamiento, Modelamiento y métodos de estimación de carga de baterías de Pb-Ácido.

---

### 2.1 Introducción

La primera celda electroquímica fue gracias al físico italiano Alejandro Volta, cuya celda consistía en varillas de cobre y zinc sumergidas en una salmuera. Este elemento se denominó como la primera “batería” de la historia y además representó la primera fuente de corriente continua desde ese entonces. Ahora en los tiempos recientes se ha convertido en un elemento vital en muchas aplicaciones. Este elemento seguirá teniendo un papel importantísimo en el avance de la humanidad, razón por la cual su estudio abarca gran interés en la comunidad científica.

### 2.2 Descripción de acumulador reversible

Las baterías también reciben el nombre de acumuladores de energía. Estos se dividen en dos tipos; el primero de ellos corresponde a los acumuladores primarios, los cuales son capaces de producir electricidad por medio de reacciones químicas que son de carácter reversible, una vez usados son desechados o reciclados. El segundo tipo corresponde a los acumuladores secundarios en los que se diferencian del tipo anterior, las reacciones químicas que producen electricidad pueden ser invertidas por la corriente eléctrica sin que se produzca degradación inmediata del acumulador.

De [2] se señala una completa definición: *“Un acumulador de energía, puede ser definido como reservorio capaz de entregar energía eléctrica a un circuito exterior a expensas de la energía química contenida en las sustancias internas que lo conforman, si el acumulador admite el proceso inverso, es decir, es capaz de acumular energía química en las sustancias que contiene a costas de la energía eléctrica suministrada desde el exterior se dice entonces que el acumulador es reversible”*.

De esta definición se desprende que, dentro de todo acumulador, debe haber una unidad básica de generación y absorción de energía eléctrica, dicha unidad recibe el nombre de celda electroquímica. Una celda electroquímica desde el punto de vista físico, está compuesta de un electrodo positivo y de un electrodo negativo separados por un electrolito, el cual es capaz de conducir iones entre ambos electrodos. Entre ambos electrodos se ubica un separador poroso, que tiene como misión evitar que estos entren en contacto, para evitar un cortocircuito. El separador es poroso debido a la necesidad de transporte de iones entre un electrodo y otro.

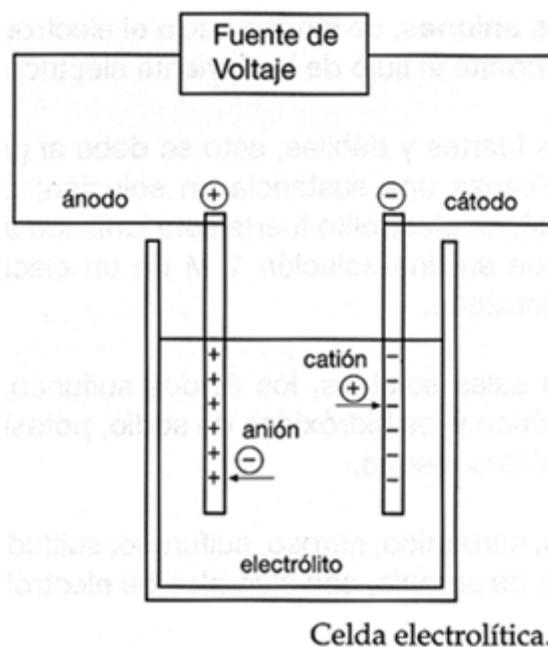


Figura 2.1: Diagrama celda electroquímica. [2]

## 2.3 Principio químico de funcionamiento

En [1] y [2] se menciona que los acumuladores están formados por unidades básicas denominadas celdas electroquímicas, las cuales están compuestas por electrodos sumergidos en un electrolito. Entre los electrodos generalmente se utiliza un separador, encargado de liberar o absorber carga eléctrica y así evitar posibles cortocircuitos entre éstos.

El proceso de generación y almacenamiento de energía eléctrica en acumuladores, es debido a que tanto los electrodos como el electrolito tienen sustancias activas las cuales al reaccionar entre sí almacenan o generan energía eléctrica. Por ello es necesario identificar las sustancias químicamente activas presentes en una celda electroquímica.

Es posible encontrar los siguientes tres tipos de sustancias activas.

- Sustancia activa del polo negativo.
- Sustancia activa del electrolito.
- Sustancia activa del polo positivo.

### 2.3.1 Sustancia activa del polo negativo

La sustancia activa del polo negativo generalmente es un metal puro susceptible de combinarse con la sustancia activa del electrolito para formar sales, hidróxidos u otros.

Los compuestos resultantes de la interacción antes señalada se caracterizan por tener menor nivel energético que las sustancias activas originales.

### **2.3.2 Sustancia activa del electrólito**

El electrólito corresponde a una solución compuesta por algún ácido, hidróxido o sal disuelta en un solvente, el que generalmente es agua. El proceso químico que se lleva a cabo en la solución es el siguiente. Las moléculas del soluto al disolverse en el solvente, se disocian en sus respectivos iones (positivo y negativo) las cuales pueden moverse libre e independientemente en el interior de la solución, mientras que las moléculas del solvente permanecen inertes, es decir, no se disocian en iones.

Una característica distintiva del electrólito, es que además de ser capaz de conducir iones entre ambos electrodos, deben ser un aislante eléctrico, ya que de lo contrario se generaría un proceso de auto descarga de la batería acompañado de un corto circuito interno entre ambos electrodos.

### **2.3.3 Sustancia activa del polo positivo**

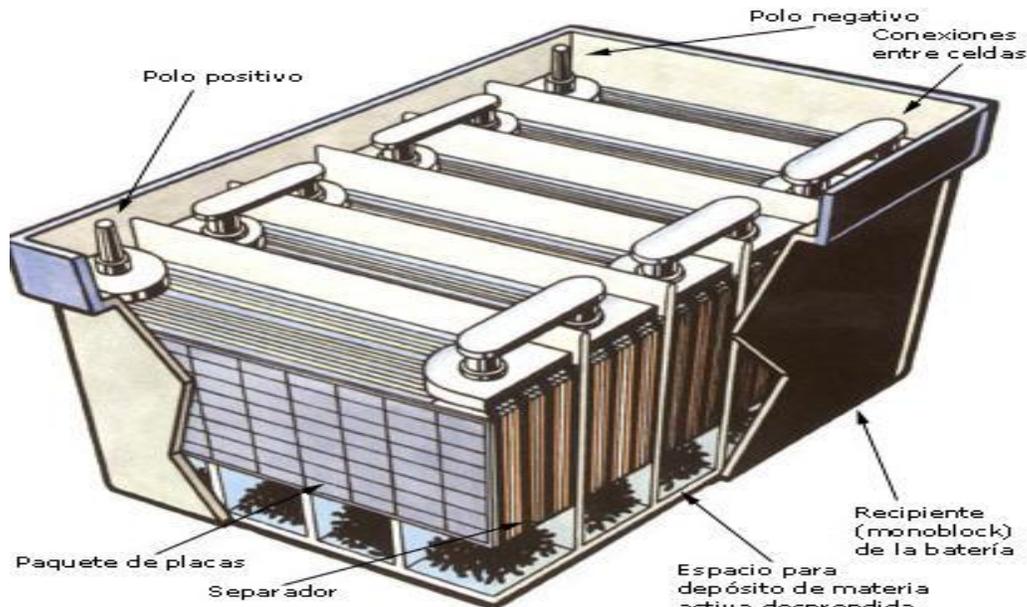
La sustancia activa del polo positivo puede ser un metal, algún óxido u otra sustancia, cuyos cristales o moléculas al igual que lo que ocurre con la sustancia activa del polo negativo, pueden combinarse con la sustancia activa del electrolito para formar compuestos de menor nivel energético.

## **2.4 Acumulador Plomo ácido**

El acumulador de plomo fue inventado en 1859 por el electroquímico francés Gastón Planté [2], quien construyó un rollo en espiral con dos placas de plomo puro, las que separó con un paño de lino, todo éste conjunto fue sumergido en un vaso de vidrio que contenía una solución de ácido sulfúrico, y así nació la primera batería de la historia. Este acumulador fue perfeccionado más tarde por Fauré, quien en 1881 revistió las láminas de plomo con una pasta de óxidos de plomo, ácido sulfúrico y agua. Este “curado” de las láminas se convierte en sustancia activa, lo que aumenta notablemente la capacidad del sistema electroquímico en relación al acumulador Planté.

Desde su invención a la fecha este acumulador aún sigue vigente, y es todavía el más fabricado en el mundo. Ha dominado durante muchos años el mercado, y se sigue utilizando en aplicaciones vehiculares, sistemas en los cuales es necesario contar con energía de respaldo, y en sistemas fotovoltaicos, entre otros. Esta última aplicación ha reforzado su protagonismo en el mercado mundial.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es que existe gran disponibilidad, presenta un bajo costo, y un bajo nivel de auto descarga, además ser de fácil fabricación. Mientras que las principales desventajas radican en su baja densidad energética, la necesidad de mantenimiento, en los materiales que lo componen, los cuales son altamente contaminantes.



**Figura 2.2: Batería de plomo ácido Fuente: [2]**

## 2.5 Conceptos asociados a acumuladores de energía.

Un acumulador posee varias características que dan información acerca de él. De [6] se desprende la siguiente división en grupos, el primero corresponde a magnitudes físicas directamente medibles sobre la batería, el segundo corresponde a las características que deben ser determinadas en base a pruebas de laboratorio y finalmente el ultimo corresponde a indicadores que solo pueden ser estimados en base a otras magnitudes que pertenecen a los otros grupos (variables determinadas directamente y variables determinadas en base a pruebas de laboratorio).

De las magnitudes físicas que pueden ser medidas, se encuentra la tensión, la corriente, la temperatura y la densidad del electrólito. Las características que deben ser determinadas por medio de pruebas de laboratorio son: la capacidad, la resistencia interna, y la respuesta en frecuencia. Por último, los indicadores que deben ser estimados corresponden al estado de carga (SoC, por sus siglas en inglés) y al estado de salud (SoH, por sus siglas en inglés).

## 2.5.1 Magnitudes directamente medibles

Como se mencionó anteriormente este tipo de magnitudes o características de la batería, tienen la particularidad de ser medidas directamente desde ésta mediante sensores especializados para dicho fin. Ellas corresponden a: tensión, corriente, temperatura, y densidad del electrolito [3] [6] [8] [2]. Se detallan a continuación:

### 2.5.1.1 Tensión

La tensión en los bornes de una batería se puede medir mediante multímetros o sensores más complejos. Esta magnitud es muy importante ya que define el rango de operación normal de la batería. Este rango depende específicamente de la tecnología de la batería utilizada, y es parte de la información comercial brindada por el fabricante. Cabe señalar que violar esta especificación provocaría daños en la batería, los que incluso podrían llegar a dejarlo inutilizable [3] [8].

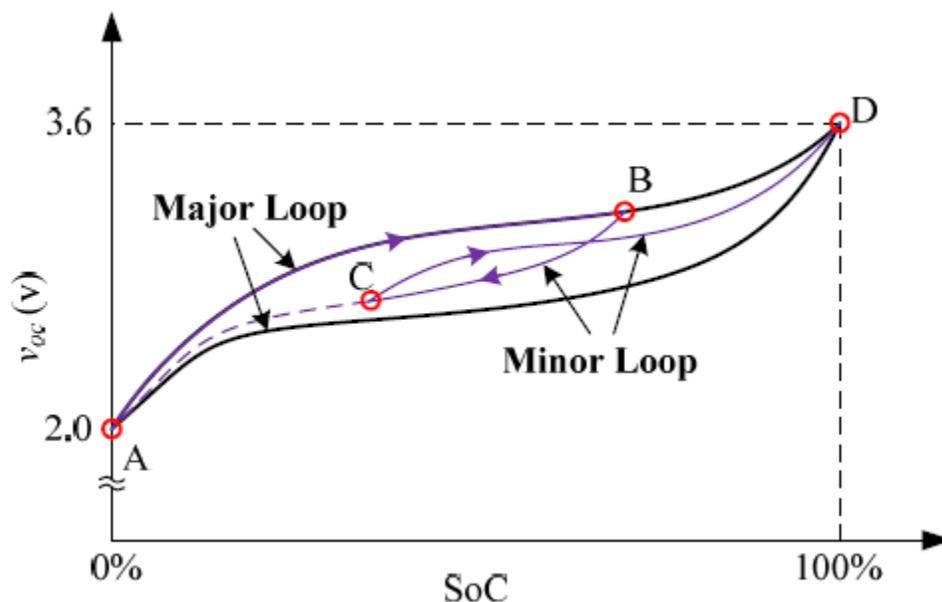
Un concepto importante relacionado con la tensión, es la denominada tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), que se define como la tensión en bornes de la batería estando ésta sin carga conectada y tras un periodo de reposo. Esta tensión es relevante cuando se quiere determinar el estado de carga ya que ambas magnitudes están directamente relacionadas [3].

### 2.5.1.2 Tensión de circuito abierto

Como se mencionó en el punto anterior, el  $V_{oc}$  está relacionado de forma directa con el SoC, sin embargo, es importante mencionar que esto es una simplificación de la realidad ya que además se ve afectado por la historia de la batería y por la temperatura [17].

La relación  $SoC$  *v/s*  $V_{oc}$  generalmente se determina mediante una prueba experimental denominada tensión de relajación que consiste en extraer una carga conocida a la batería, luego detener la descarga, esperar un tiempo adecuado de reposo de manera de asegurar que la tensión medida en bornes corresponda efectivamente al  $V_{oc}$  [17]. Este algoritmo se desarrolla para distintos puntos de la curva  $SoC$  *v/s*  $V_{oc}$ , con lo cual se tiene un mapeo de ella. Si se aplica este método tanto a la carga como a la descarga, se verían efectos de histéresis.

Para ilustrar lo anterior en la figura 2.3 se presenta la curva de histéresis característica de un acumulador. En ella la batería fue cargada desde el 0% de SoC (punto A) hasta un 70% de este (punto B), luego fue descargada hasta un 40% del SoC (punto C), y finalmente fue cargada hasta el 100% (punto D)



**Figura 2.3 Influencia de la histéresis en la curva SoC vs Voc [2]**

En la figura 2.3 se observa que la curva de histéresis está acotada tanto superior como inferiormente por las curvas *major loop* y *minor loop* respectivamente, esta curva demuestra que al mismo nivel de SoC, una batería puede tener un valor diferente de Voc, esto sucede porque el Voc es mayor en un proceso de carga que un proceso de descarga. Para determinar dichas envolventes en [17] se propone descargar la batería con pulsos de 10 minutos seguidos por periodos de descanso de una hora, con esto se obtiene la curva superior. Para la inferior se utiliza el mismo perfil considerando pulsos de la carga.

Debido a que el tiempo de reposo de una batería puede ser del orden de horas e incluso días, es que se comenta un trabajo en [5] en el cual se presenta un método rápido de determinación de la curva SoC v/s  $V_{oc}$ . El protocolo propuesto es el siguiente: Al comienzo del ciclo de carga, se inyecta 1[Ah] a la batería, luego de esto viene un periodo de descanso de 1[min] tras el cual se inyectan 10[Ah] a la batería, seguidos de periodos de descanso de 1[min], tras el cual se inyectan 10[Ah] a la batería, seguidos de periodos de descanso de 1[min]. Una vez cargada la batería se espera una hora y comienza el proceso de descargar con el mismo procedimiento que se explicó para la carga. Los resultados obtenidos con este método se muestran en la figura 2.4

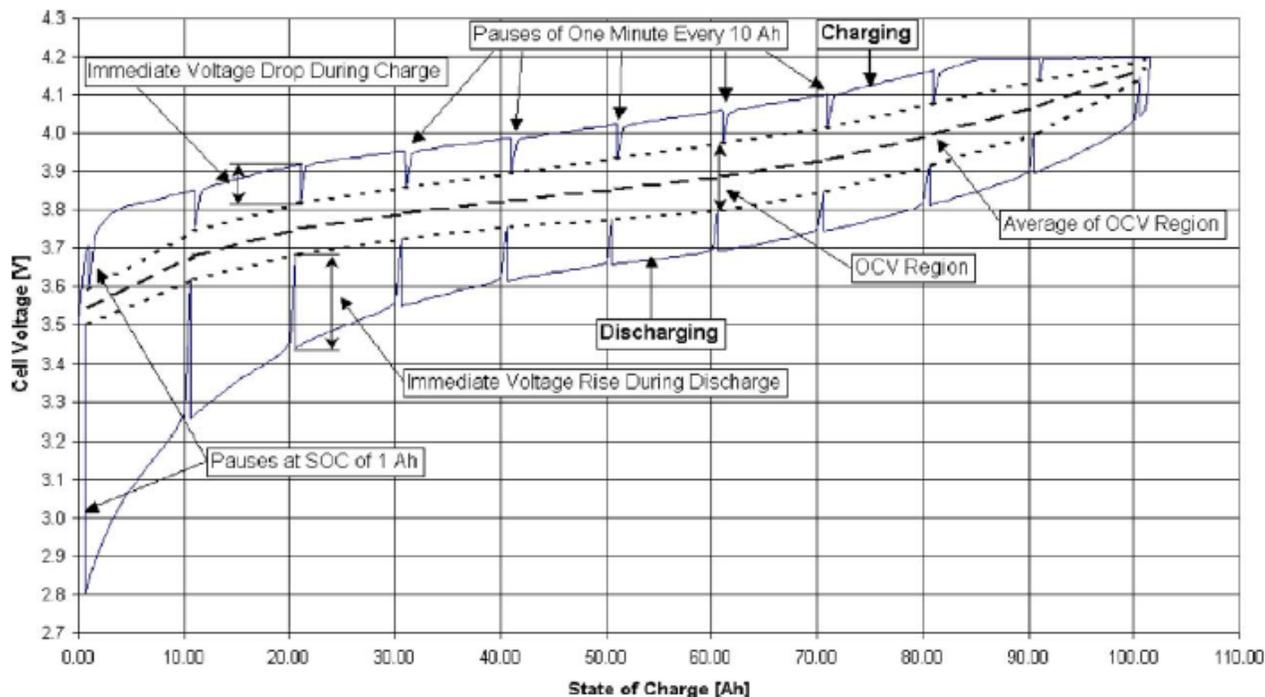


Figura 2.4 Test rápido para la obtención de la curva SoC v/s Voc [5]

El desempeño del algoritmo propuesto se comparó con los resultados obtenidos mediante la prueba de tensión de relajación. Ambos test se aplicaron tanto a una batería con historia como a una batería nueva. El desempeño de ambos métodos se muestra en la figura 2.5

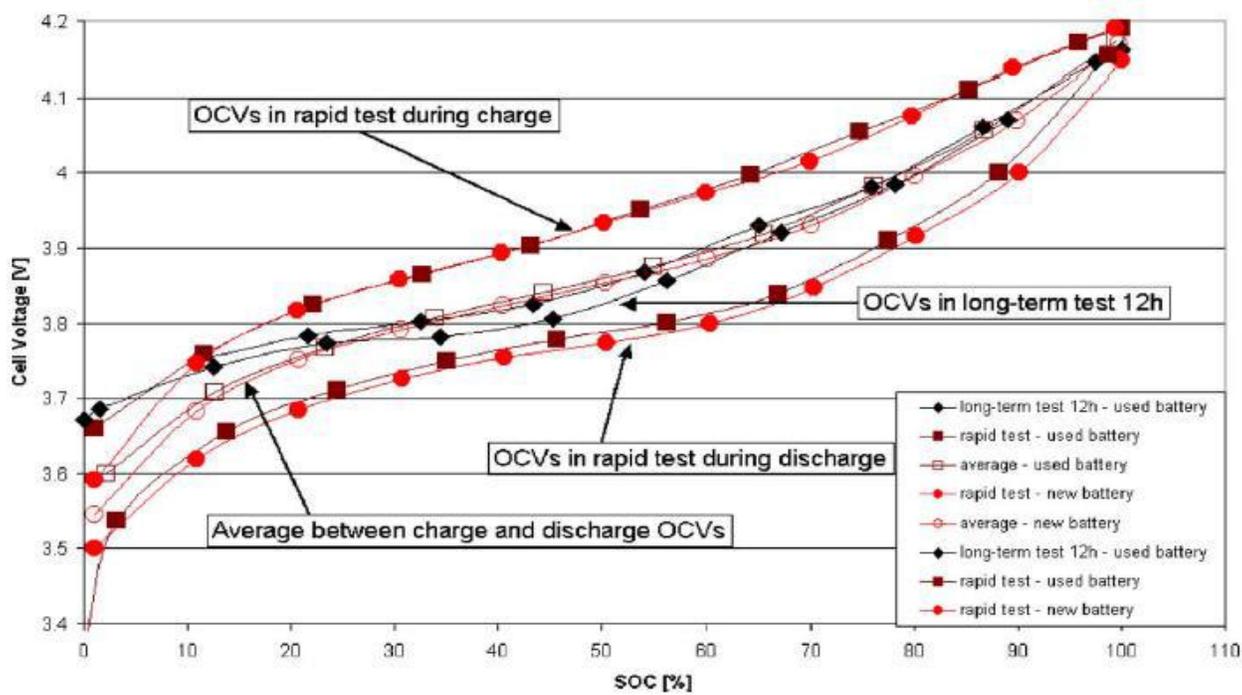
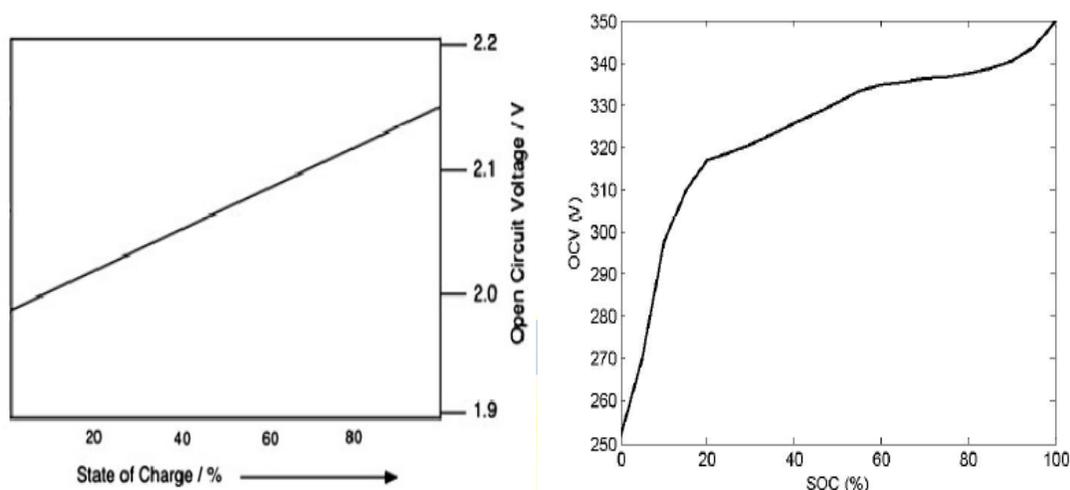


Figura 2.5 Comparación método propuesto [5]

En esta figura se tiene que los resultados de la estrategia propuesta son satisfactorios en el rango 20%-100% del SoC esto sucede porque el VoC en el restante porcentaje (0%-20% ,80-100%) parece comportarse de una manera altamente no lineal, bajo este intervalo, la curva obtenida se encuentra por debajo de la obtenido mediante la prueba de tensión de relajación. Esto puede deberse a que el tiempo de reposo entre carga y descarga es pequeño.

Finalmente, en la Figura 2.6, se presentan las curvas que representan la relación tanto en baterías de plomo ácido como de ion litio polímero.

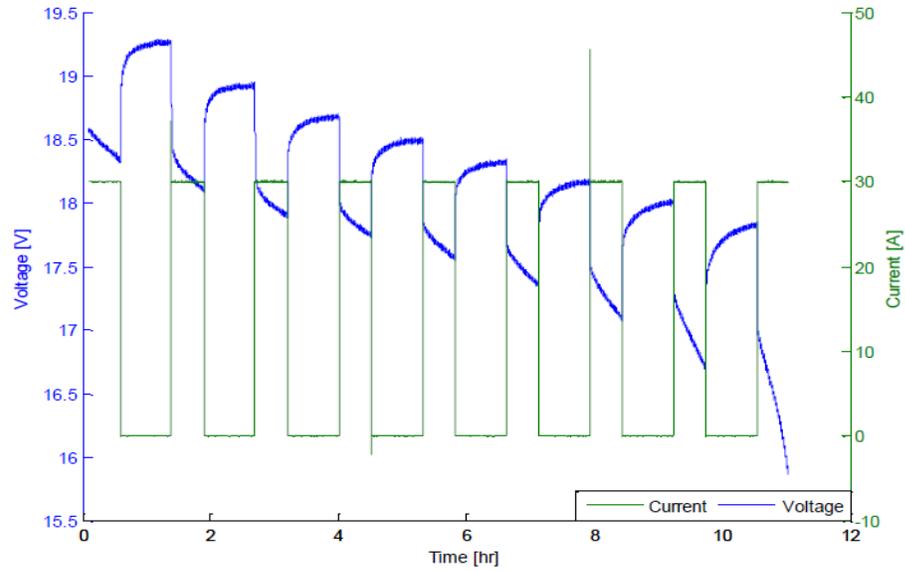


**Figura 2.6 A la izquierda curva SoC v/s Voc para batería plomo ácido, a la derecha curva SoC v/s Voc para batería ion litio [5]**

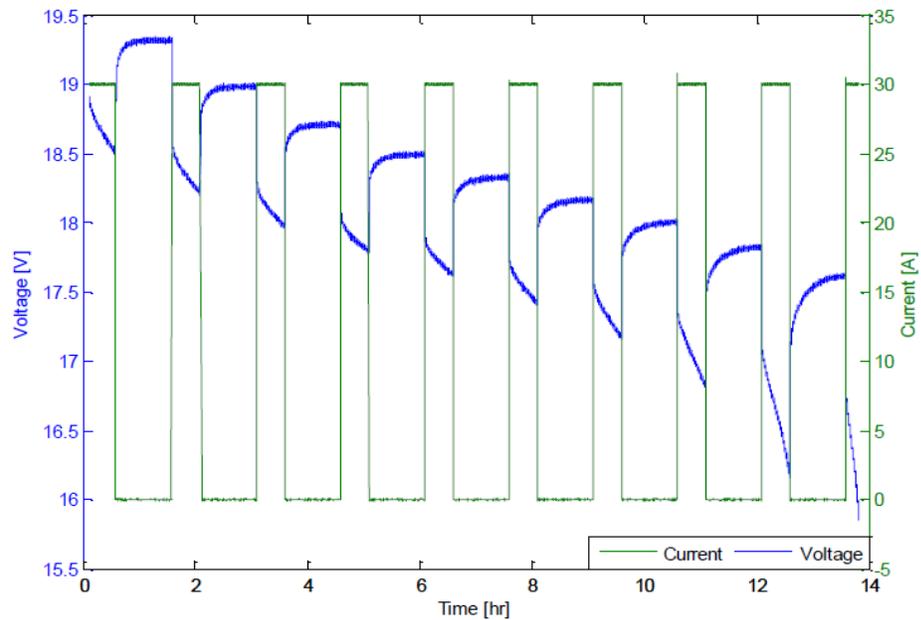
De la figura 2.6 se aprecia que la relación entre la tensión de circuito abierto y el estado de carga, es lineal para baterías con tecnología de plomo ácido, y no lineal para baterías de ion litio polímero.

Otro método se propone en [6] en la figura 2.7 se muestra la prueba que consiste en periodos de descarga (de 30[min]) a una corriente constante de 30[A] alternada con periodos de descanso (corriente cero), de duración 48[min]. Este patrón se repite hasta que el banco de baterías está totalmente descargado, es decir, cuando la tensión en bornes sea igual o inferior a 15.85[V].

La prueba mostrada en la figura 2.8 es similar a la prueba mostrada en figura 2.5



**Figura 2.7 Prueba de relajación con reposos de 48[min] [6]**



**Figura 2.8 Prueba de relajación con reposos de 60[min] [6]**

Con esta prueba se puede determinar el comportamiento del sistema ante el mismo perfil de descarga y a distintos niveles de SoC. Por este motivo que ésta se utiliza en el proceso de identificación de parámetros del modelo analizado en este trabajo.

### 2.5.1.3 Corriente

La corriente se mide en la batería, mediante multímetros o sensores especializados para dicho fin. En la actualidad los sensores más utilizados son los que realizan la medición haciendo uso del efecto Hall.

La corriente que entra o sale de la batería es muy importante, y al igual que para el voltaje, el fabricante brinda rangos de ésta tanto para la carga como para la descarga los que aseguran que la batería no sufra daños. Además de esto, generalmente el fabricante señala los *peaks* de corriente que la batería puede soportar sin dañarse.

### 2.5.1.4 Temperatura

La temperatura del electrolito presente en las baterías, se mide mediante termómetros o circuitos integrados especializados para este fin. Hay que mencionar que esta magnitud es uno de los factores que más influyen en el desempeño de un batería, ya que afecta directamente a muchos de los parámetros de éste, como son por ejemplo: estado de carga (SoC), estado de salud (SoH), capacidad, resistencia interna, entre otros. Es por ello que es recomendable medirla continuamente, y más aún en aplicaciones donde la batería esté sometido continuamente a regímenes de carga/descarga.

La temperatura de un batería, está determinada por una parte por las pérdidas Joule internas y por otra, por la temperatura de trabajo, teniendo una mayor influencia esta última. Es por esto, que al dimensionar un tipo de acumulador para una aplicación determinada, lo primero que hay que determinar, es la temperatura ambiente en la cual se desenvolverá. Una vez hecho esto, hay que buscar un acumulador comercial que se adapte a las condiciones de trabajo, teniendo en cuenta que el desempeño eléctrico de la batería cae bruscamente en los extremos, especialmente en el rango de las temperaturas bajas.

Debido a que la mayoría de las baterías se encuentran sellados, resulta muy difícil determinar la temperatura exacta a la cual se encuentra el electrolito, lo que se hace usualmente es situar un sensor de temperatura entre los polos de la batería, estando éste aislado térmicamente del ambiente mediante una capa protectora para este fin, con lo cual se logra reducir las perturbaciones térmicas externas.

### 2.5.1.5 Densidad del electrolito

La densidad del electrolito se define como la cantidad de masa de éste por unidad de volumen. Esta característica sólo puede ser medida en baterías de plomo ácido del tipo VRLA (Valve regulated lead acid, por sus siglas en inglés. En este tipo de baterías se tiene acceso al electrolito).

La importancia de la medición de la densidad del electrolito radica en que para estas baterías se tiene que la densidad se relaciona de manera lineal con el estado de carga, como se observa en la figura 2.9

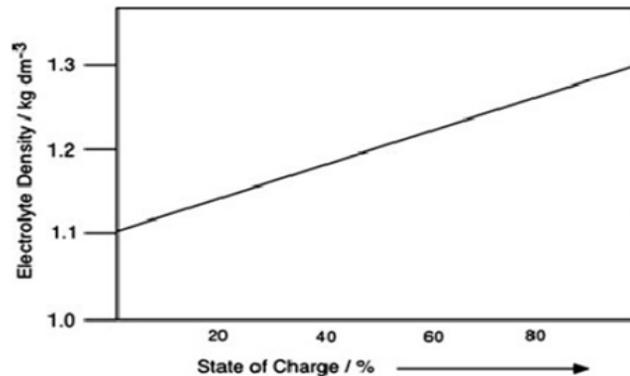


Figura 2.9 Relación entre densidad del electrolito y SoC para baterías plomo ácido. [2]

Generalmente se tiene que la densidad se mide en forma directa con un instrumento denominado acidómetro, el cual posee un flotador graduado con una escala de colores, que indica en base al nivel de flotación, la densidad y el estado de la batería según las premisas de: “batería cargada”, ”batería cargada a medias” y “batería descargada”. Existen, además, métodos indirectos de medición, por ejemplo, técnicas que miden la concentración de iones en el electrolito, la viscosidad, o la conductividad.

## 2.6 Magnitudes de baterías obtenidas mediante pruebas experimentales

### 2.6.1 Capacidad

La capacidad de un batería se define como la carga que es posible extraer de éste, en un proceso de descarga para un determinado nivel de corriente. Sin embargo, si al batería se le extrae toda la carga que contiene en su interior, puede sufrir daños en las sustancias activas que lo conforman,

es por ello que generalmente se define una capacidad útil, que es menor a la capacidad neta del acumulador, y que asegura que éste no sufra daños en las sustancias internas que lo conforman.

La capacidad útil se define como la carga que puede entregar la batería, durante un determinado periodo de tiempo, para una determinada corriente de descarga, de tal manera que la tensión en bornes al final de la descarga, sea igual o superior a una determinada tensión mínima admisible, la cual asegura que la batería no sufra daños por exceso de carga extraída.

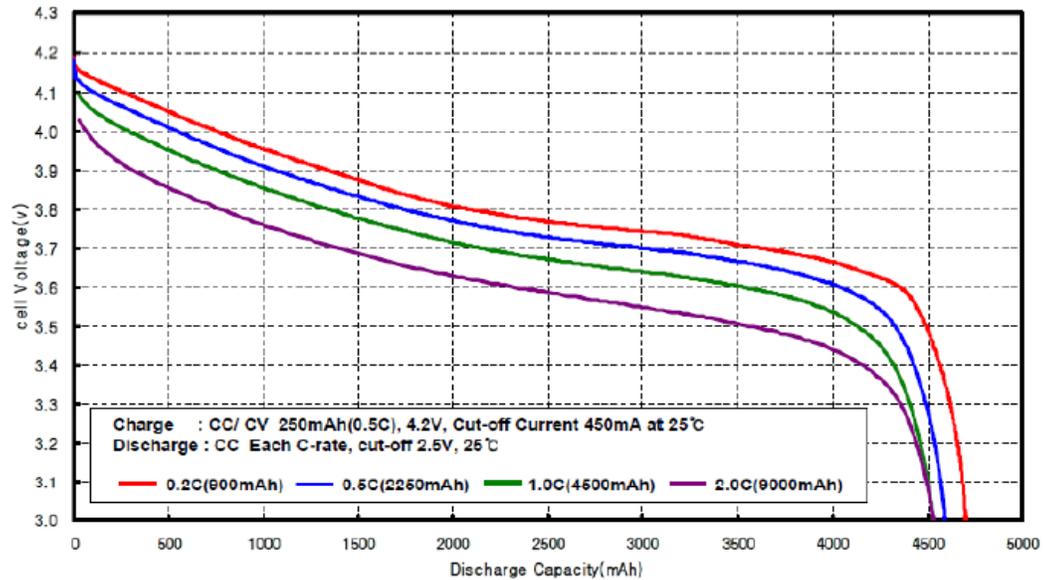
Es importante mencionar que la capacidad de un batería no es constante y depende de muchos factores, tales como la temperatura, número de ciclos de carga/descarga, nivel de corriente de carga/descarga, entre otros. Debido a esto es que a nivel comercial se hace alusión a la capacidad nominal de la batería, la cual dice relación con la capacidad útil que puede entregar ésta de manera que la tensión medida en bornes, sea igual o superior a la tensión mínima comercial admisible.

La capacidad nominal se obtiene mediante una prueba de capacidad a temperatura, tiempo de descarga y tensión final por celda específicas. Para baterías de plomo ácido existen principalmente dos normas para establecer estos parámetros. La primera de ellas, corresponde a la norma europea (EN) y la segunda a la norma norteamericana. En la tabla siguiente se presentan las especificaciones de cada una de estas normas.

**Tabla 2.1. Características norma europea y norteamericana [6]**

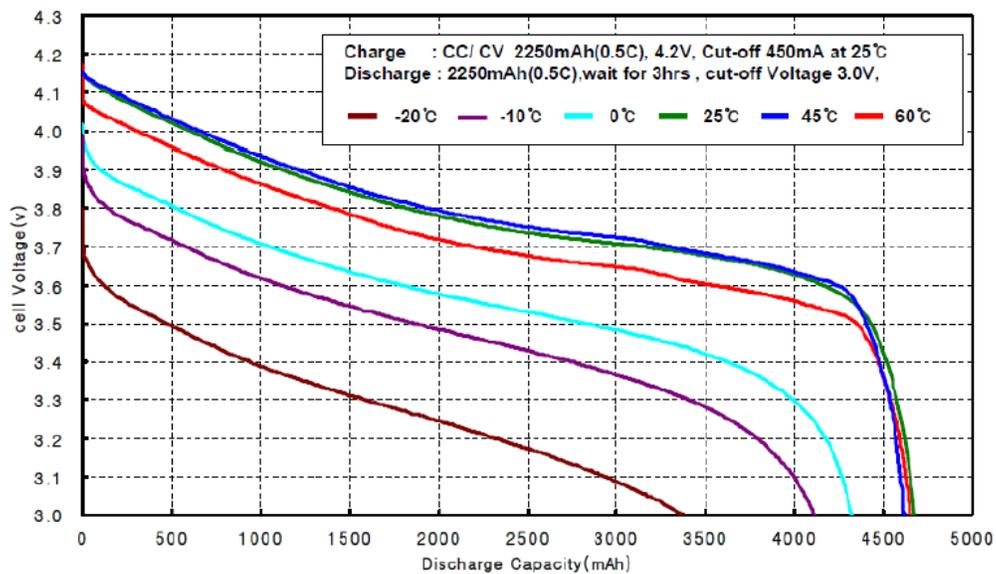
	EN	ANSI
Tiempo nominal de descarga	10[h]	8[h]
Tensión al final de la descarga	1.8[V/cell]	1.75[V/cell]
Temperatura nominal de la batería	20°C	25°C

En las figuras 2.10, 2.11 y 2.12 se muestran las pruebas de capacidad para un batería de ion litio polímero dadas por el fabricante. Dichas pruebas están en función de la corriente de descarga, temperatura, y número de ciclos de vida respectivamente.



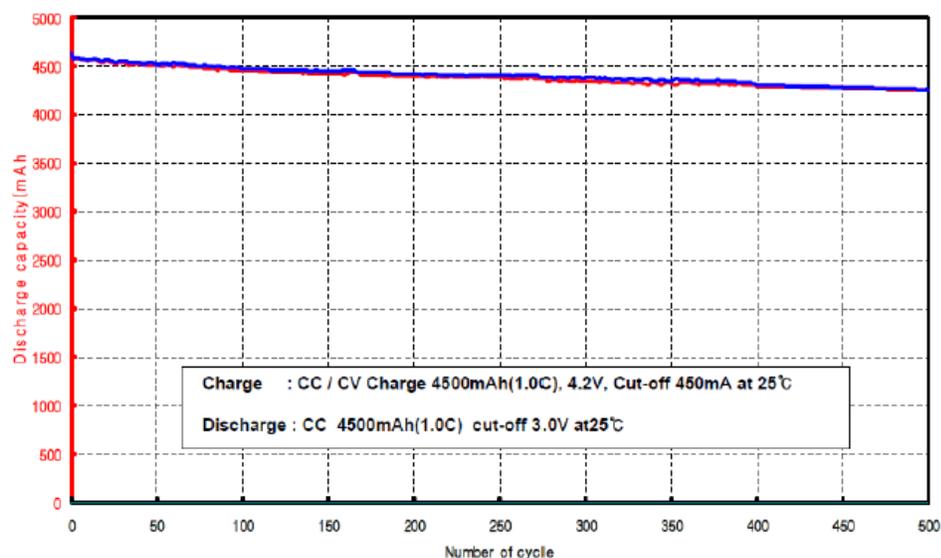
**Figura 2.10 Prueba de capacidad para batería ion-litio polímero en función de la corriente [6]**

En la figura 2.10 queda en evidencia que la capacidad de la celda varía con la corriente de descarga, se tiene que la capacidad aumenta con la disminución de dicha corriente. Luego, si se desea tener mayor capacidad que la nominal es aconsejable descargar la celda a una corriente menor que la nominal. Finalmente se concluye que la corriente de descarga tiene un efecto directo sobre la capacidad de la celda, esto es importante de considerar para realizar la modelación de la batería.



**Figura 2.11 Prueba de capacidad de ion litio polímero [6]**

De la figura anterior se encuentra que el efecto de la temperatura es muy importante sobre la capacidad de la celda. Se tiene que la capacidad de ésta disminuye bastante con la disminución de la temperatura, así, por ejemplo, si se compara la capacidad a una temperatura de descarga de  $-20^{\circ}\text{C}$ , se encuentra que la primera disminuye su capacidad aproximadamente un 22% respecto de la segunda, porcentaje que es bastante considerable. De la figura 2.10 y 2.11 se concluye que la batería es más sensible a variaciones de temperatura que a variaciones de corriente.



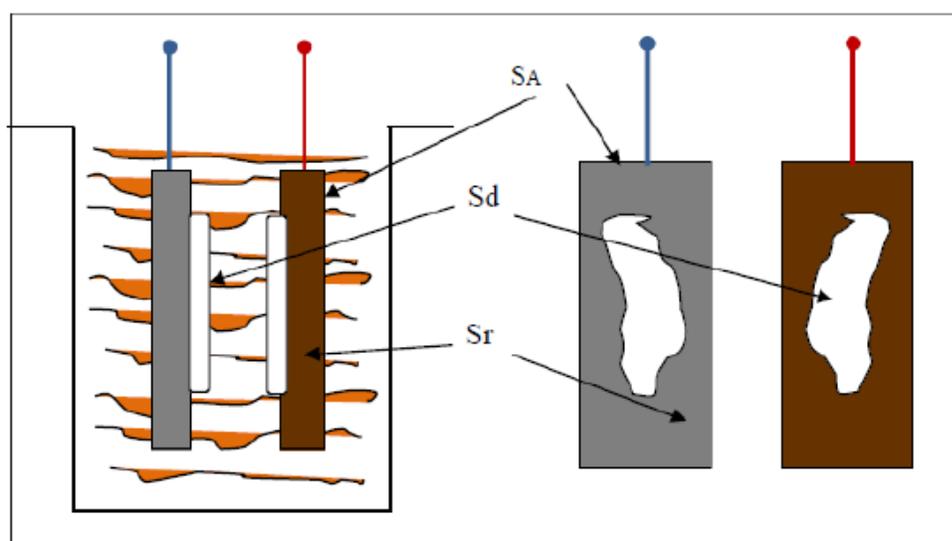
**Figura 2.12 Prueba capacidad batería ion litio polímero [6]**

De la figura 2.12 se observa que existe una dependencia de la capacidad de la batería con el número de ciclos de vida, dicha dependencia parece ser lineal para la celda analizada. Se tiene que la capacidad de la batería al final de su vida útil (500 ciclos) es aproximadamente un 6% menor que la capacidad de una celda que está en el inicio de su vida útil.

Finalmente destacar que si se midiera la capacidad que se extrae de un batería y se compara con la capacidad que se le inyectó previo a ser descargado se encontraría que ambas no son iguales, más aún se encontraría que la capacidad a la descarga es siempre menor que la capacidad a la carga, lo cual es evidencia de que parte de la corriente de carga se utiliza en procesos secundarios de ciclo cerrado que tienen lugar dentro del acumulador. Basándose en esta situación, es que se define una eficiencia para las baterías, la cual es usualmente conocida con el nombre de eficiencia coulombica, la que es encargada de dar cuenta este fenómeno.

## 2.6.2 Resistencia interna

A medida que las baterías reversibles se van descargando, disminuye la sustancia activa existente y disponible en la superficie de sus placas, la cual es remplazada por sustancia degradada. Como consecuencia de ello, se tiene que la superficie conductora útil original de las placas es remplazada por moléculas de sustancia degradada, y, por lo tanto, estas superficies ya no intervienen en la conducción eléctrica (ver Figura 2.13). Todo este fenómeno genera una resistencia interna propia de la batería, la cual varía en el tiempo, y depende entre otros factores, de la temperatura del electrolito, corriente de carga/descarga, estado de carga y estado de salud.



**Figura 2.13 Formación de resistencia interna de un batería [2]**

Al cargar la batería, las placas reconstituyen su composición original y la resistencia interna empieza a disminuir hasta que adquiere el valor de la resistencia original que presentaba cuando éste estaba totalmente cargado.

De lo anterior, se desprende que teóricamente los acumuladores reversibles podrían descargarse y cargarse todas las veces que fuera necesario, sin embargo, en la práctica, esto no es posible ya que durante estos procesos parte de las sustancias degradadas se desprenden de las placas o se disuelven en el electrolito, como consecuencia de esto, se tiene que la resistencia interna aumenta con el ciclaje de la batería.

Es importante destacar que además de la resistencia antes mencionada, existe otra, que es denominada “resistencia de fuga natural de la batería”, que se origina por el hecho que el solvente

siempre presenta pequeñas cantidades de iones e impurezas, las que le brindan cierto grado de conductividad. Debido a esto, es que, en los procesos de carga o descarga, e incluso en circuito abierto, se genera una corriente adicional dentro de la batería, lo que constituye una carga adicional conectada en paralelo al consumo.

Las dos resistencias antes aludidas constituyen la resistencia interna de la batería. Sin embargo, ya que la resistencia debida a las sustancias degradadas es mucho mayor que la resistencia de fuga, esta última usualmente se desprecia.

El valor de resistencia interna es del orden de los mili-ohm, los métodos más usuales para medirla son: con un puente de resistencias, con un divisor de corriente o con una medida a cuatro hilos. De entre las tres, destaca la técnica de divisor de corriente para aplicaciones dinámicas de la batería.

## 2.7 Magnitudes de baterías que deben ser estimados

En esta sección se analizan las características de los acumuladores que no pueden ser medidas, y por tanto deben ser estimadas indirectamente en base a las magnitudes de los dos grupos anteriores. En esta categoría se encuentra el estado de carga de un acumulador (SoC) y el estado de salud (SoH). A continuación, se detalla cada una de ellos.

### 2.7.1 Estado de carga (SoC)

El estado de carga indica la capacidad total de la batería que todavía está disponible para ser entregada al sistema del cual forma parte. Normalmente se expresa en forma de porcentaje, donde 100% indica que la totalidad de la capacidad de la batería está disponible para ser utilizada, y 0% indica que no hay capacidad disponible en el acumulador.

Es importante mencionar que el SoC se determina con respecto a la capacidad instantánea del acumulador, esto debido a que como se vio en capítulos anteriores, la capacidad de un acumulador no es fija, sino que depende de muchos factores. Sin embargo, en muchos trabajos se simplifica el problema, determinando el SoC en base a la capacidad nominal de la batería.

Junto con el SoC se define la profundidad de descarga de un batería (DoD, depth of discharge, por sus siglas en inglés), la cual indica cuanta energía se ha extraído del acumulador con respecto a su capacidad instantánea, evidentemente se tiene que  $SoC = (100 - \%DoD)$ .

El SoC se relaciona con otras magnitudes de las baterías, en particular con el voltaje de circuito abierto, con la densidad del electrolito y con la resistencia interna, no obstante en aplicaciones

dinámicas, medir estas magnitudes resulta prácticamente imposible, razón por ello se hace necesaria su estimación en base a características fáciles de medir como son por ejemplo, tensión corriente y temperatura.

En [9] se muestran las curvas de SoC vs Voltaje que fueron testeados a los siguientes valores de corriente: 1C, 2C, 3C, 4C. En la figura 2.14 se asume un voltaje de umbral de 2.6 [V] para el 0% del SoC.

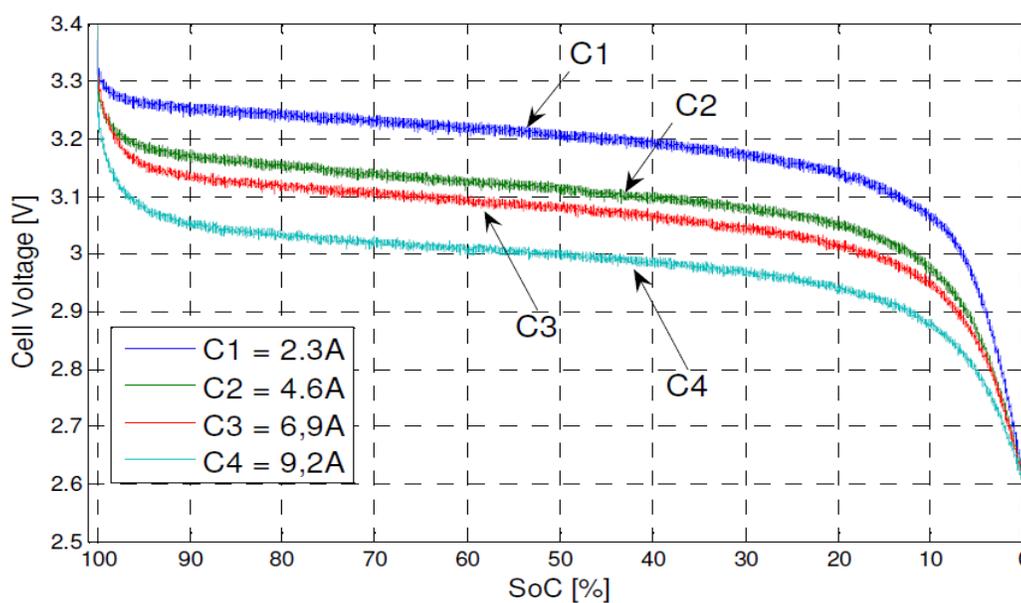


Figura: 2.14 Prueba de capacidad a distintas corrientes [9]

### 2.7.2 Estado de salud (SoH)

Debido a las reacciones químicas secundarias que tienen lugar dentro de la batería, tales como, corrosión, sulfatación o pérdida de agua, es que los elementos que componen las celdas electroquímicas van sufriendo daños, lo que se traduce en la variación de los parámetros que la describen, especialmente en la impedancia interna. Debido a esto, se vuelve necesario añadir un indicador que dé cuenta de este fenómeno, es decir que muestre el estado de salud o SoH del acumulador.

El SoH es por tanto un indicador que señala el punto que ha alcanzado la batería en su ciclo de vida, esto en relación a un acumulador nuevo. Al igual que para el SoC, el SoH generalmente se expresa en porcentaje que indica la fracción de los ciclos de vida que aún le quedan por brindar.

El SoH, se ve afectado por varios factores, entre los más importantes se encuentra la corriente de carga/descarga, la temperatura, la profundidad de descarga (DoD), la forma en que se ha cargado, exceso de carga, exceso de descarga, condiciones de almacenamiento y duración de éste.

## 2.8 Enfoques para la modelación de baterías

En [6],[9],[10] es posible encontrar diversos tipos de enfoques para la modelación de baterías de energía. Algunos son desarrollados en el dominio del tiempo, otros en el dominio de la frecuencia. Algunos pueden ser representados en forma circuital ya sea en corriente continua o alterna. Los enfoques pueden además incorporar cierta incertidumbre en la modelación o pueden estar basados en algún sistema de aprendizaje supervisado, como redes neuronales o lógica difusa, por ejemplo.

De acá desprendemos que existen una amplia gama de enfoques para modelar acumuladores de energía, motivo por el cual estos se agrupan según las categorías presentadas en la siguiente tabla.

**Tabla 2.2. Enfoques para la modelación de acumuladores de energía.**

Enfoque	Características
Modelos electroquímicos	Representación de reacciones electroquímicas y termodinámicas y de construcción del acumulador
Modelo circuital en continua	Representación de procesos electroquímicos del acumulador en el dominio eléctrico DC
Modelo circuital en alterna	Representación de procesos electroquímicos del acumulador en el dominio eléctrico AC
Modelo tipo caja negra	En base a datos de entrada-salida generan un modelo de la batería.
Modelos Estocásticos	La modelación se asume que es un proceso estocástico, tipo cadena de Markov
Modelo Heurísticos	Se representa alguna característica del acumulador por medio de una heurística

### 2.8.1 Modelos electroquímicos

Estos modelos [2] están basados en la representación de reacciones electroquímicas y procesos termodinámicos que tienen lugar dentro de la batería, además de las características de la construcción física del mismo. Es por ello que este tipo de modelación resulta ser muy precisa, ya que la modelación es a nivel microscópico. Generalmente estos modelos están compuestos por sistemas acoplados de

ecuaciones diferenciales no lineales, lo que implica que las simulaciones necesiten horas o incluso días para llevarse a cabo, por esta razón, es que una implementación en tiempo real resulta imposible. Otra desventaja de este enfoque es que la modelación realizada sólo es válida para la batería analizada.

Este enfoque es capaz de tomar muchos fenómenos en cuenta, tales como las variaciones de la capacidad con el perfil de corriente, efectos térmicos, efectos de construcción y efectos de recuperación de la batería. Por esta razón, es que este enfoque es considerado el más preciso de todos los aquí tratados. Desafortunadamente también resulta ser el más costoso computacionalmente.

J.Newman [2] desarrolla en modelo electroquímico isotérmico para describir la carga y descarga de una batería. Para derivar las ecuaciones diferenciales utiliza la teoría de concentración de soluciones, aplicada a concentraciones de litio, densidad de corriente, y distribución de temperatura en la batería. Posteriormente D.Rakhmatov simplifica el modelo de Newman para trabajar en una dimensión. Newman y Rakhmatov proponen la existencia de dos tipos de modelos, el primero de ellos se encarga de representar el rendimiento electroquímico de la batería, mientras que el segundo modela el comportamiento térmico.



## 2.8.2 Modelos circuital en corriente continua

Este enfoque se basa en el traslado de los procesos internos de la batería, al dominio eléctrico DC. Esto por medio de modelos que utilizan una combinación de resistencias, capacitancias, fuentes de voltaje y fuentes de corriente [3].

Este enfoque resulta ser el más adecuado cuando se desea simular computacionalmente la batería junto al sistema del cual forma parte. Esto debido a la naturaleza eléctrica del modelo.

Hay que mencionar que existen modelos que son capaces de representar el comportamiento de la batería frente a perfiles de descarga variables, representar las variaciones de la capacidad del acumulador, y tomar en cuenta efectos térmicos. Sin embargo, ninguno de los modelos conocidos hasta el momento toma en cuenta los efectos de recuperación. Esencialmente, este efecto se presenta en perfiles de descarga con tiempos de inactividad, se caracteriza por un aumento de la capacidad de la batería en los periodos de descanso con respecto a la que presentaba inmediatamente antes de entrar en esa situación.

Los modelos circuitales son muy utilizados en la actualidad, ya que además de los aspectos favorables antes señalados, ofrece un excelente compromiso entre complejidad y precisión, y brinda

la posibilidad de analizar diversas tecnologías de baterías por medio de softwares de simulación eléctrica [3].

### 2.8.3 Modelo circuital en corriente alterna

El principio de este tipo de modelación es el mismo que para el caso continuo la única diferencia es que en este caso el objetivo es determinar un circuito equivalente del acumulador en corriente alterna. Al trasladar la perspectiva al dominio eléctrico AC, se introducen además los conceptos de impedancia, frecuencia y fase. Estos tipos de modelos permiten simular con gran precisión la respuesta transitoria de la batería, como son, por ejemplo: arranques de motores, incidencia de la conexión/desconexión de cargas, problemática de cortocircuitos y circuitos abiertos, entre otros. Otra ventaja de este enfoque es que, al utilizar características de impedancia, se tiene cierta información del estado general de la batería, debido a que esta es dependiente del SoC, SoH, temperatura, entre otras.

La desventaja de este tipo de modelación es que es poco eficiente para simular respuestas de la batería en régimen permanente, ya que para hacerlo se hace necesario invertir recursos con gran cantidad de cálculos.

En [7] se presenta un completo modelo eléctrico AC, el cual intenta caracterizar los fenómenos electroquímicos que tiene lugar dentro de una batería de ion litio, sin embargo, otras tecnologías de baterías también pueden ser caracterizadas con este modelo.

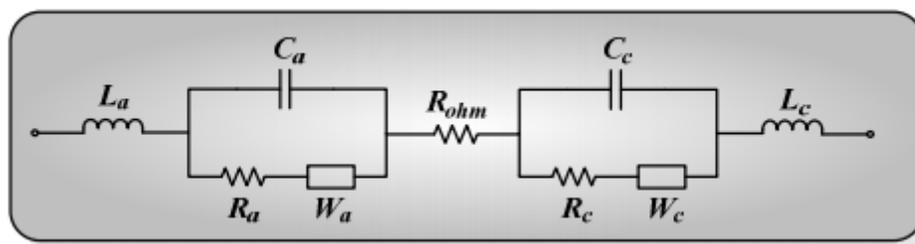


Figura 2.15: Modelo eléctrico en AC [7]

### 2.8.4 Modelo tipo caja negra

Este enfoque [3] es importante ya que permite realizar una modelación, sin la necesidad de tener conocimiento de la dinámica de la batería. Su formulación se basa en analizar la respuesta del sistema, frente a diferentes condiciones de trabajo, y en base a esta información, formular un modelo que tiene la capacidad de adaptarse al cambio y de aprender de la experiencia. En la literatura se han

utilizado métodos como redes neuronales y lógica difusa para formular la modelación en base a la información disponible del sistema.

Estos métodos generalmente utilizan como entrada la corriente que entra o sale de la batería, la temperatura de éstas, entre otras características. La salida usual, corresponde a la tensión en bornes o al estado de carga.

Las redes neuronales y lógica difusa, si bien ofrecen una buena relación entre complejidad y precisión presentan tres desventajas importantes. La primera de ellas, es que estos enfoques se ven condicionados por los datos utilizados para su implementación. La segunda, es que no existe un sentido físico en la formulación de sus ecuaciones y la tercera, radica la necesidad de contar con un gran número de datos experimentales para entrenar la red en el caso de redes neuronales, y para establecer las reglas difusas, en el caso de lógica difusa.

### **2.8.5 Modelos estocásticos**

Este enfoque es un cambio de paradigma de acuerdo a los anteriormente analizados, ya con él se abandonan los sistemas determinísticos para pasar a sistemas caracterizados con incertidumbre, en los cuales la característica a modelar pasa a ser un proceso estocástico.

Este enfoque basa su desarrollo en cadenas de Markov en tiempo discreto, la cual es un tipo especial de proceso estocástico, en el que la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediatamente anterior, es decir, este tipo de proceso estocástico “recuerda” el último evento y esto condiciona las posibilidades de los eventos futuros.

En [12] se propone un modelo estocástico para representar los efectos de recuperación del acumulador, cuando a éste se le aplica un pulso de descarga. También se generaliza este modelo para incorporar los efectos de la tasa de corriente sobre la capacidad de la batería. En dicha formulación, la carga se expresa como una demanda estocástica conformada por unidades de carga. Ambos modelos están basados en la construcción de una cadena de Markov de tiempo discreto.

### **2.8.6 Modelos heurísticos**

Este tipo de modelos utilizan una heurística para modelar una característica específica de la batería. Los elementos de ésta se determinan por medio de un ajuste de parámetros de tal modo que los resultados coincidan con las mediciones.

Las heurísticas utilizadas generalmente dan cuenta de la capacidad de la batería y de su tiempo de vida. Si bien, esta modelación es sencilla de realizar, resulta ser muy imprecisa, y debe ser utilizada sólo en aplicaciones donde interesa tener un orden de magnitud de la característica modelada.

Las heurísticas más comunes corresponden a la ecuación de Peukert, la modelación de la eficiencia de la batería, y el modelo de Weibull [7].

La ecuación de Peukert, expresa la relación no lineal existente entre la capacidad de la batería y la tasa de corriente de descarga [7]. El modelo de eficiencia da cuenta de la relación entre el tiempo de vida de la batería con distintas distribuciones de corriente. Finalmente, el modelo de Weibull dice relación con un método estadístico para modelar el comportamiento del acumulador en el estado de descarga Mayor información acerca de estas heurísticas se encuentra disponible en [7]

## 2.9 Modelos fenomenológicos para acumuladores de energía

En esta sección se darán a conocer los modelos más usuales para representar el comportamiento de las baterías. Por cada uno de ellos se presenta su formulación circuital, su forma analítica en tiempo discreto, además de sus ventajas y desventajas.

### 2.9.1 Modelo de Thevenin capa simple

Este modelo simplifica los procesos electroquímicos que tienen lugar dentro de la batería [13], su característica principal es que se representa en base a elementos eléctricos, como se muestra en la siguiente figura,

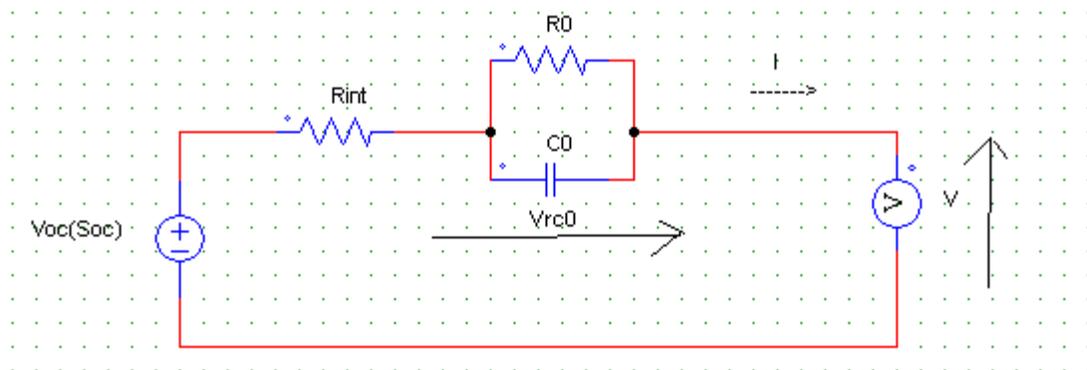


Figura 2.16: Modelo de Thevenin [22]

En la figura 2.16,  $R_{int}$  corresponde a la resistencia interna de la batería,  $C_0$  a la capacitancia entre las placas de los electrodos y  $R_0$  a la resistencia no lineal debida a la resistencia de contacto entre las placas de los electrodos y el electrolito.

La fuente de tensión  $V_{oc}$  tiene un carácter lineal para baterías de plomo ácido y carácter no lineal para baterías de ion litio [8] [13].

Las siguientes ecuaciones muestran el modelo de Thevenin de capa simple (en tiempo discreto), en ellas se asume que la corriente es positiva para la carga y negativa para la descarga. El parámetro  $T$  corresponde al periodo de muestreo [13].

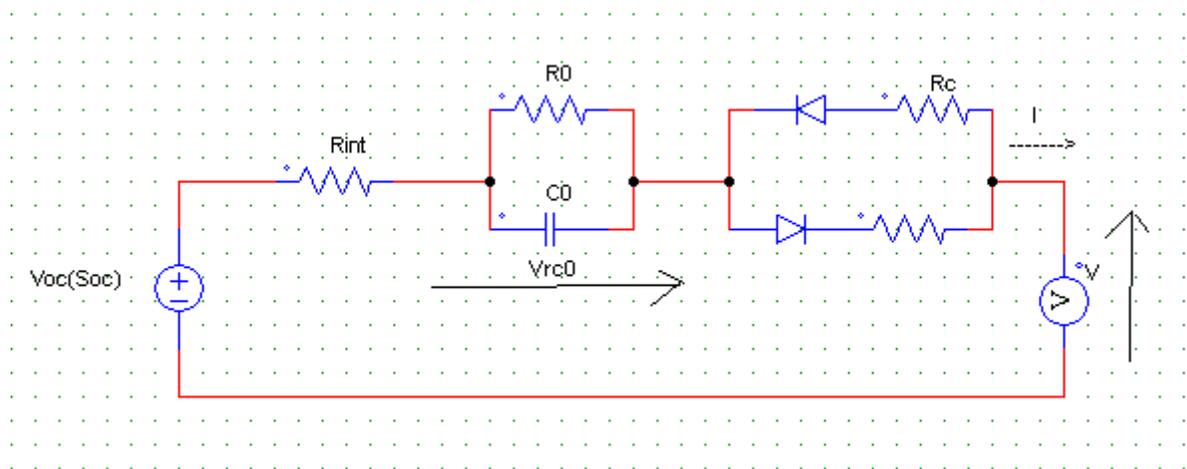
$$V_{k+1}^{rc0} = V_k^{rc0} e^{-\frac{T}{R_0 C_0}} + I_k R_0 \left( 1 - e^{-\frac{T}{R_0 C_0}} \right) \quad (2.1)$$

$$V_k = V_{oc}(SoC) + I_k R_{int} + V_k^{rc0} \quad (2.2)$$

Las principales desventajas del modelo de Thevenin es que asume que los valores de las resistencias y las capacitancias son constantes, siendo que en realidad dependen del estado de carga, tasa de descarga, edad de la batería y temperatura. Otra desventaja es que no permite tener información acerca de la vida útil de la batería.

Su principal ventaja es que por su naturaleza circuital, es fácil de implementar en softwares de simulación.

En [14] se trabaja con una variante del modelo de Thevenin, el cual presenta dos resistencias internas, una para el proceso de carga ( $R_c$ ) y otra para el proceso de descarga ( $R_d$ ). Esto se muestra en la siguiente figura 2.17.



**Figura 2.17: Variante del modelo de Thevenin**

Las ecuaciones en tiempo discreto del modelo presentado en la figura, se muestran a continuación.

$$V_{k+1}^{rc0} = V_k^{rc0} e^{-\frac{T}{R_0 C_0}} + I_k R_0 \left( 1 - e^{-\frac{T}{R_0 C_0}} \right) \quad (2.3)$$

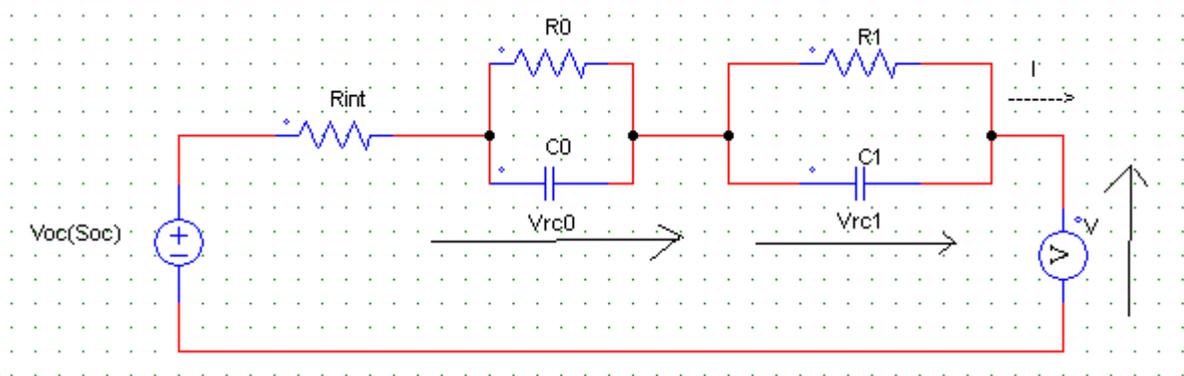
$$V_k = \begin{cases} V_{oc}(SoC) + I_k R_c + V_k^{rc0}, & \text{si } I > 0 \text{ (carga)} \\ V_{oc}(SoC) + I_k R_d + V_k^{rc0}, & \text{si } I < 0 \text{ (descarga)} \end{cases} \quad (2.4)$$

Este modelo presenta las mismas características y limitaciones que el modelo original de Thevenin, la mejora sustancial está en que se realiza una diferenciación entre la resistencia de carga ( $R_c$ ) y descarga ( $R_d$ ), lo que mejora su desempeño.

## 2.9.2 Modelo de Thevenin doble capa

Al modelo previamente señalado es posible agregarle “n” ramas RC, con esto mejora notablemente su desempeño, con el costo de aumentar su complejidad. En relación a lo anterior en [15] se sugiere que con dos ramas RC es posible caracterizar los efectos de polarización y difusión que tienen lugar en el interior de las baterías de energía.

Este modelo es mostrado en la figura 2.18



**Figura 2.18: Modelo Thevenin doble capa**

En esta figura se tiene una rama RC que representa los fenómenos de polarización, mientras que la rama restante es la encargada de representar los fenómenos de difusión.

Las ecuaciones en tiempo discreto del modelo de Thevenin de capa doble son las siguientes.

$$V_{k+1}^{rc0} = V_k^{rc0} e^{-\frac{T}{R_0 C_0}} + I_k R_0 \left(1 - e^{-\frac{T}{R_0 C_0}}\right) \quad (2.5)$$

$$V_{k+1}^{rc1} = V_k^{rc1} e^{-\frac{T}{R_1 C_1}} + I_k R_1 \left(1 - e^{-\frac{T}{R_1 C_1}}\right) \quad (2.6)$$

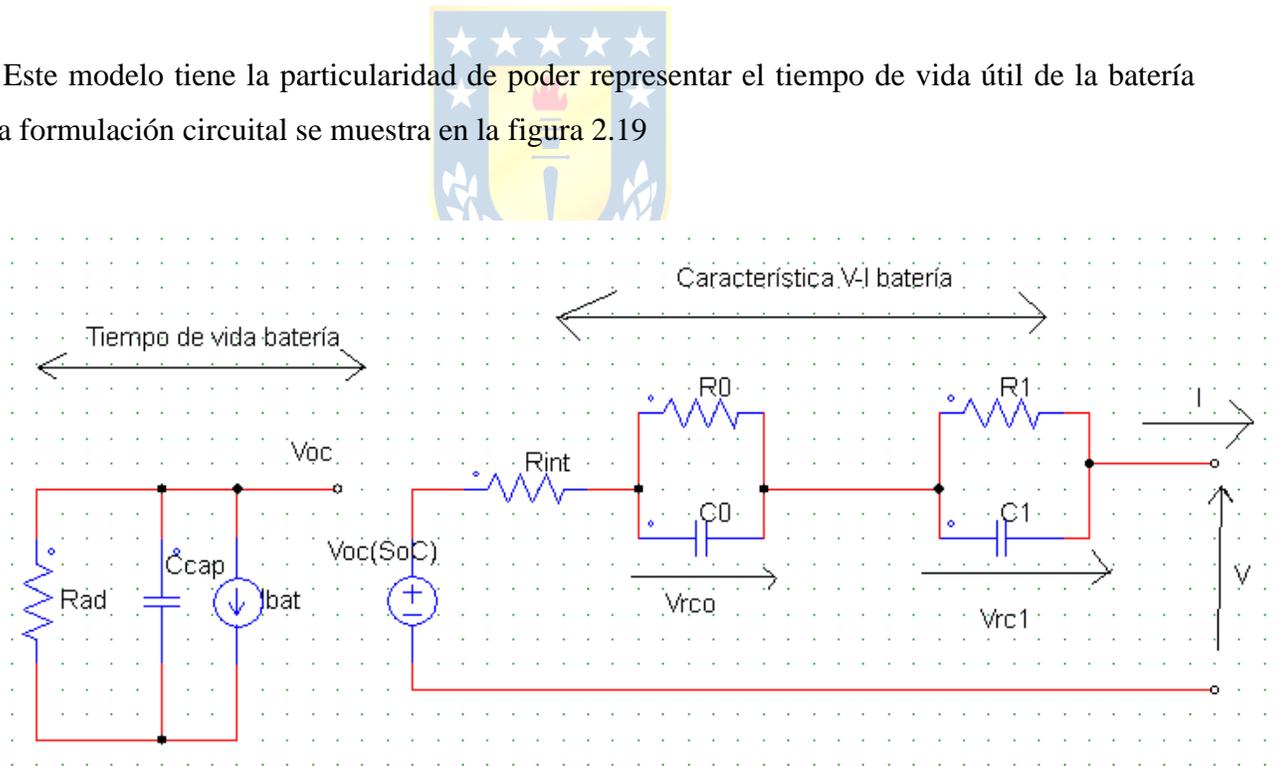
$$V_k = V_{oc} SoC + I_k R_{int} + V_k^{rc0} + V_k^{rc1} \quad (2.7)$$

El modelo de Thevenin de doble capa al igual que el de capa simple presenta la desventaja de asumir los valores de sus elementos como constantes. Además, que no es capaz de representar el tiempo de vida útil de la batería.

El modelo de dos capas permite representar una mayor cantidad de fenómenos que el modelo de Thevenin de capa simple. Por esta razón el desempeño es mejor en el de capa doble.

### 2.9.3 Modelo de Thevenin Runtime

Este modelo tiene la particularidad de poder representar el tiempo de vida útil de la batería [16]. La formulación circuital se muestra en la figura 2.19



**Figura 2.19: Modelo Thevenin Runtime**

En la figura se muestra que la rama derecha es el modelo de Thevenin de capa simple, el cual es el encargado de representar la característica V-I de la batería. Por otro lado, la rama de la izquierda es la encargada de representar la pérdida de capacidad de la batería debido a los ciclos de uso. En

dicha rama  $R_{ad}$  corresponde a la resistencia de auto descarga propia del acumulador,  $C_{ap}$  se relaciona con la capacidad nominal de la batería, y la fuente de corriente representa la corriente que circula por la batería.

La ventaja de esta formulación sobre las anteriores mencionadas, es que permite representar la degradación de la batería con los ciclos de vida. Los parámetros se determinan en función del estado de carga.

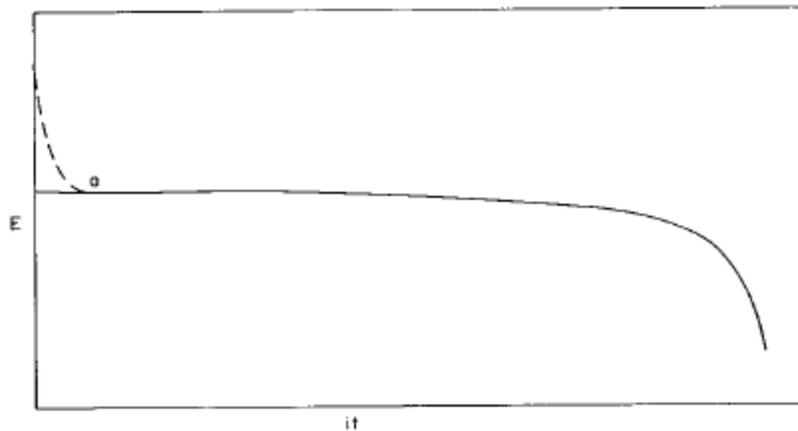
### 2.9.4 Modelo de Shepherd

En [6], se propone un modelo matemático para representar la tensión en bornes de la batería en función del estado de carga y de la corriente. Esto para regímenes de carga y descarga realizados a corriente constante. El modelo está dado por la ecuación

$$V = V_0 + \frac{K}{1 - SoC} I + RI - \text{sgn}(I) A e^{-B SoC} \quad (2.8)$$

Donde  $V_0$  representa la tensión electroquímica de la batería,  $k$  la pendiente de la curva de polarización,  $R$  la resistencia interna y  $A$  y  $b$  corresponden a constantes para ajustar los datos experimentales.

Generalmente en este modelo se desprecia la parte exponencial debido a que su contribución es solo para explicar la caída inicial de tensión en la batería.



**Figura 2.20: Contribución parte exponencial del modelo Shepherd**

Según esta figura, se plantea el siguiente modelo simplificado dado por la ecuación:

$$V_b = V_{oc} + \frac{k}{SoC} I + RI \quad (2.9)$$

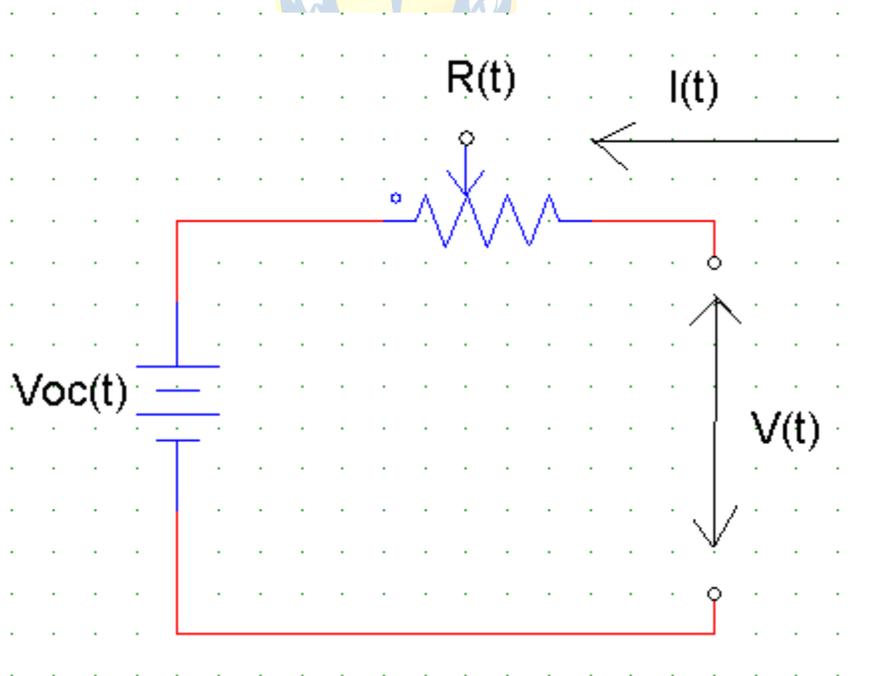
La principal desventaja de este modelo es que solo es aplicable a perfiles de carga y descarga constantes, además que se especifica que su desempeño en procesos de descarga y sobrecarga no es bueno.

Para ello se incorpora los efectos de la temperatura, con lo cual se originan el modelo de Copetti y Chenlo, el que es explicado a continuación.

### 2.9.5 Modelo de Copetti y Chenlo

Como se mencionó anteriormente, este modelo es una ampliación del modelo de Shepherd, el cual corrige los problemas de este en las zonas de carga y sobrecarga, además de incluir los efectos de temperatura. Este modelo posteriormente es afinado en [3] ya que presentaba una discontinuidad en la transición al pasar de estado de carga al estado de descarga.

La batería se modela como una fuente de Tensión  $V_{oc}(t)$  y una resistencia interna variable  $R(t)$ . La fuente de tensión representa la relación entre la tensión de circuito abierto y el estado de carga de la batería, mientras que la resistencia representa la oposición al flujo de corriente que presenta el acumulador debido a los fenómenos electroquímicos que tienen lugar en su interior. El esquema de este modelo es mostrado en la figura 2.21.



**Figura 2.21: Esquemático modelo Copetti y Chenlo**

Para la formulación del modelo se asume que los elementos tienen la siguiente dependencia.

$$R = f(I(t), SoC(t), T) \quad (2.10)$$

$$V_{oc} = f(SoC(t)) \quad (2.11)$$

El SoC, se determina en base a una capacidad instantánea y un factor de eficiencia. La capacidad instantánea depende de la corriente y la temperatura, mientras que el factor de eficiencia depende solamente de la corriente.

La ecuación para el estado de carga, la capacidad instantánea y el factor de eficiencia se muestran a continuación.

$$SoC(t) = \frac{1}{C(t)} \int_{-\infty}^t \eta(w) I(w) dw \quad (2.12)$$

Donde  $C(t)$  corresponde a la capacidad instantánea de la batería (dada por la ecuación (2.13)) y  $\eta(w)$ , hace alusión a la eficiencia coulombica dada por la ecuación (2.14).

$$C(t) = \frac{C_n C_c}{1 + A_c \left[ \frac{I(t)}{I_n} \right]^{B_c}} (1 + q_{1c} \Delta T + q_{2c} \Delta T^2) \quad (2.13)$$

En la ecuación (2.13), se tiene que  $C_n$  corresponde a la capacidad nominal de batería (en [Ah]),  $I_n$  dice relación con la corriente nominal de descarga asociada a  $C_n$ ,  $\Delta T$  hace alusión a la variación de temperatura con respecto a la temperatura de referencia. Finalmente  $C_c, A_c, B_c, q_{1c}, q_{2c}$  son parámetros del modelo.

$$\eta(t) = f(x) = \begin{cases} 1, & I(t) < 0 \\ \frac{E_a [1 - SoC(t)]}{I t^{E_b + E_a}} & I(t) > 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

En la ecuación 2.14  $I_{10}$  corresponde a la corriente de descarga tal que la batería demora 10[hr] en descargarse es decir, la corriente asociada a la capacidad a 10[hr] de la batería ( $C_{10}$ ). Esta información esta disponible en el datasheet de la batería. Finalmente  $E_a$  y  $E_b$ , son parámetros de modelo de eficiencia.

La formulación del modelo divide la operación de la batería en cuatro zonas de operación, una para la carga, otra para la descarga, una zona de transición y una zona de sobrecarga. Las ecuaciones de las tres primeras zonas son presentadas a continuación.

### Zona de descarga

$$V_d(t) = V_{0d} - K_{0d}(1 - SoC(t)) - \frac{|I(t)|}{C_{10}} \left[ \frac{P_{1d}}{1 + |I(t)|^{P_{2d}}} + \frac{P_{3d}}{SoC(t)^{P_{4d}}} + P_{5d} \right] (1 - q_d T) \quad (2.15)$$

En la ecuación 2.15 el término  $V_{0d} - K_{0d}(1 - SoC(t))$ , es el encargado de modelar la curva SoC v/s  $V_{oc}$  de la batería. Los parámetros  $P_{1d}, P_{2d}, P_{3d}, P_{4d}, P_{5d}$  son coeficientes de pérdida asociados a la resistencia interna,  $C_{10}$  corresponde a la capacidad a 10 horas de la batería, y finalmente  $q_d$ , relaciona el modelo con la temperatura.

### Zona de carga

$$V_c(t) = V_{0c} - K_{0c}(SoC(t)) - \frac{|I(t)|}{C_{10}} \left[ \frac{P_{1c}}{1 + |I(t)|^{P_{2c}}} + \frac{P_{3c}}{SoC(t)^{P_{4c}}} + P_{5c} \right] (1 - q_c T) \quad (2.16)$$

En la ecuación 2.16, el término  $V_{0c} - K_{0c}(SoC(t))$ , es el encargado de modelar la curva SoC v/s  $V_{oc}$  de la batería. Los parámetros  $P_{1c}, P_{2c}, P_{3c}, P_{4c}, P_{5c}$  son coeficientes de pérdida asociados a la resistencia interna,  $C_{10}$  corresponde a la capacidad a 10[hr] de la batería, y finalmente  $q_c$ , relaciona el modelo con la temperatura.



### Zona de transición

En esta zona se define un umbral  $|I_d|$  tal que cuando la magnitud de la corriente es menor que el umbral, entonces la batería opera en la zona de transición.

$$V_t(t) = \frac{[V_c|I_d - V_d|I_d)}{2I_d} ]I(t) + \frac{V_c|I_d + V_d|I_d}{2} \quad (2.17)$$

La ventaja del modelo de Copetti y Chenlo es que toma en cuenta los efectos de la temperatura sobre el sistema. En la bibliografía se realiza una comparación entre el desempeño de este modelo y el de Thevenin de capa simple, esto con la información del banco de baterías presente en la micro-red Huatacondo[8]. En este trabajo se encontró que el desempeño del modelo de Copetti es mejor que el de Thevenin Sin embargo la principal desventaja de este es que divide la respuesta de la batería en zonas de operación, por lo cual su implementación es complicada en la práctica.

## 2.9.6 Discusión

En esta sección se abordaron las principales características e indicadores asociados a baterías de energía. Luego se puso de manifiesto los distintos enfoques que existen en la actualidad para realizar su modelación. Finalmente se concluyó con una revisión del estado del arte referente a modelos fenomenológicos utilizados para representar a los acumuladores de energía.

La determinación de un modelo para la batería en estudio, es un paso hacia el objetivo final de determinar el estado de carga. Es por este motivo que una vez establecido el modelo, es posible utilizar éste, junto con algún método de estimación, para determinar el SoC de la batería.

## 2.10 Métodos para la determinación del SoC en baterías de Plomo-ácido.

En esta sub-sección se presentan los distintos métodos que existen para determinar el estado de carga en acumuladores de energía.

### 2.10.1 Método de medición de la densidad del electrolito

Este método sólo es aplicable a baterías de plomo ácido del tipo VRLA (*valve regulated lead acid*) [11], en los cuales se tiene acceso al electrolito. Este método se basa en el hecho de que existe una relación lineal entre la densidad del electrolito y el estado de carga de la batería. La densidad se puede medir de manera directa con un acidómetro, o bien de manera indirecta mediante métodos que miden la concentración de iones en el electrolito, la viscosidad, o la conductividad.

Los problemas asociados a esta técnica ocurren durante el proceso de carga, donde la densidad del electrolito no es uniforme, debido a que existe una estratificación de éste, además de una pérdida de agua. Debido a esto, es que para que este método sea realmente efectivo y confiable, la medición de la densidad debe ser realizada durante el proceso de descarga. Otro inconveniente se debe a que los sensores utilizados para la medición continua, tienen un costo elevado.

Al utilizar este método, hay que tener presente que el valor de la densidad del electrolito debe ser corregido por temperatura. Para medir esta magnitud se recomienda utilizar un termómetro de alcohol, ya que con esto se elimina el riesgo de dejar inutilizable la batería ante un eventual rompimiento del termómetro dentro ella. Esto último se debe a que el alcohol no reacciona químicamente con el electrolito cosa que si ocurre con el mercurio.

**Tabla 2.3 resumen método de medición de la densidad del electrolito**

Aplicación	Solo baterías plomo ácido del tipo abierto
Principio funcionamiento	Se basa en la existencia de una relación lineal entre la densidad del electrolito y el SoC
Aplicación	Sistemas donde la batería tenga periodos de reposo
Ventajas	Fácil aplicación
Desventajas	Es muy caro para ser implementado en tiempo real

### 2.10.2 Método de voltaje de circuito abierto

Este método puede ser aplicado a todas las tecnologías de baterías. Asume que existe una relación entre el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y el estado de carga de la batería (SoC). Esta dependencia es de carácter lineal para baterías del tipo plomo ácido, y de carácter no lineal para baterías tipo ion litio. Para aplicarlo solo basta mapear la curva SoC v/s  $V_{oc}$ .

Pese a su simplicidad, este método solo puede ser aplicado en situaciones donde el acumulador está sometido a largos periodos de descanso en el caso de una batería de 12[V] puede llegar a 1 hora según datos del fabricante. Sin embargo, al combinarlo con otros (como el de la integral de la corriente, por ejemplo), es posible aplicarlo en aplicaciones dinámicas.

Algunas desventajas radican en que el voltaje de circuito abierto es dependiente de la temperatura, de la historia de la batería y además presenta efectos de histéresis lo que afecta el mapeo de la curva SoC v/s  $V_{oc}$ , y evidentemente el desempeño del método.

Las características de este método se muestran en la tabla 2.4

**Tabla 2.4 Resumen método de voltaje de circuito abierto.**

Aplicación	Todo tipo de baterías
Principio Funcionamiento	Se basa en la existencia de una relación entre el $V_{oc}$ y el SoC
Aplicación	Sistemas donde el acumulador tenga largos periodos de descanso
Ventajas	Fácil aplicación, combinado con otras técnicas permite estimación continua del SoC

Desventajas	Por sí solo, no es posible ser aplicado en tiempo real, es afectado por la temperatura, histéresis, e historia de la batería.
-------------	---

### 2.10.3 Método de la integral de la corriente

Este método consiste en registrar mediante sensores, la corriente que entra o sale de la batería e integrarla para estimar la capacidad que se ha extraído. Una vez hecho esto, se determina el SoC mediante la ecuación (2.18).

$$SoC = SoC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t I d\tau \quad (2.18)$$

Donde  $C_N$  corresponde a la capacidad nominal, e  $I$  a la corriente que entra o sale de la batería.

Usualmente a la expresión dada por la ecuación (3.18) se le agrega un factor de eficiencia coulombica ( $\eta_i$ ), por lo cual se transforma en la expresión dada por:

$$SoC = SoC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t \eta_i I d\tau \quad (2.19)$$

Donde

$$\eta_i = \begin{cases} 1, & \text{para la carga} \\ \eta_i < 1, & \text{para la descarga} \end{cases} \quad (2.20)$$

La desventaja de este método es que, al aplicar la integral en un lazo abierto, este se hace muy sensible a errores en las mediciones de corriente. Para superar esto, se puede utilizar un esquema de lazo cerrado, donde el mecanismo de realimentación puede ser diseñado empíricamente, o puede utilizar un modelo circuital, con el que se determina el  $V_{oc}$ , con el que se actualiza el SoC dado por la integral de la corriente.

En la tabla 2.5 se presentan las características de este método.

**Tabla 2.5: Resumen método de la integral de la corriente**

Aplicación	Todo tipo de baterías
Principio Funcionamiento	Se basa en la realización de un balance de la corriente que entra y sale de la batería
Aplicación	Sistemas donde el acumulador está permanentemente en funcionamiento

Ventajas	Puede ser aplicado en línea. Es simple de implementar la influencia de los errores en las mediciones de corriente pueden ser disminuidas combinándolo con el método del $V_{oc}$
Desventajas	Es muy sensible a errores en mediciones de corriente.

### 2.10.4 Método de la impedancia espectroscópica

Este método se basa en el hecho de que la impedancia de un acumulador brinda información del estado de éste. Esta información está relacionada con características de la batería, tales como el SoC, el SoH, la temperatura, ciclos de vida, entre otros. El espectro de impedancia se determina mediante la técnica denominada espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

La desventaja de este método es que las curvas de impedancia son fuertemente dependientes de la temperatura, por lo cual, solo sería utilizable en aplicaciones a temperatura constante. Además, se tiene que para poder aplicar la técnica EIS, se debe disponer de bastante tiempo para poder realizar todo el barrido en frecuencia. Por estos motivos es que este método rara vez se implementa para la determinación del SoC, más aun, su utilización para este propósito todavía es objeto de debate. Sin embargo, parece ser muy promisorio para la determinación del SoH.

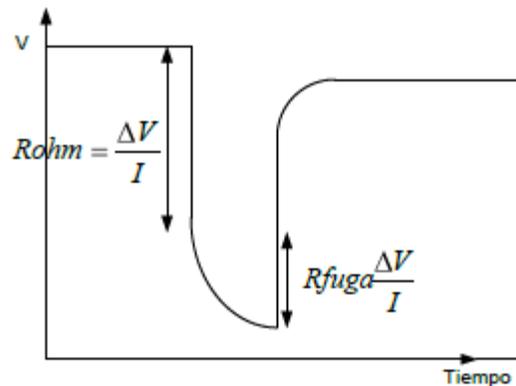
En la tabla 2.6 se presentan las características de este método.

**Tabla 2.6 Resumen método de la impedancia espectroscópica**

Aplicación	Su aplicación para determinar el SoC está aún sujeta a debate.
Principio Funcionamiento	Se basa en la modelación de la respuesta en frecuencia de la batería
Aplicación	Es promisorio para la determinación del SoH
Ventajas	EIS depende de la temperatura.

### 2.10.5 Método de resistencia interna

Todo acumulador posee una resistencia interna, la cual está compuesta de dos partes, la primera de ellas corresponde a una resistencia óhmica, la cual es producto de la resistencia propia de los electrodos de la batería, la resistencia del electrolito, la resistencia del separador y las resistencias de contacto. La segunda, corresponde a una resistencia de polarización, la cual es dependiente de la concentración del electrolito. En particular, la resistencia óhmica está relacionada con algunas características de la batería, tales como estado de carga, estado de salud, ciclos de vida, entre otros. La formulación de este método para la determinación del SoC, se basa en que existe una relación entre la resistencia interna y el estado de carga.



**Figura 2.22: Representación de Resistencia óhmica y de fuga en la respuesta de una batería frente a un escalón de corriente.**

En la Figura 2.22 se observa que la caída de tensión vertical se debe a la resistencia óhmica, mientras que la caída exponencial de tensión se debe a la resistencia de polarización. Como solo es de interés la determinación de la resistencia óhmica, se señala que si el tren de pulsos de corriente tiene un periodo menor a 10 mili-segundos, la caída de tensión registrada se deberá únicamente a esta resistencia. En [10] se comenta que para baterías del tipo plomo ácido, la variación de la resistencia óhmica desde el estado 100% SoC al 0 % SoC, es de algunos mili-ohm, es por este motivo que su utilización es más factible para determinar el SoH.

En la tabla 2.7 se presentan las características de este método

**Tabla 2.7 Resumen método de la Resistencia interna**

Aplicación	Debido a que la variación de la resistencia con el SoC es del orden de los mili Ohms, rara vez se aplica para determinarlo
Principio Funcionamiento	Medición de la resistencia interna de la batería
Aplicación	Este método es más apropiado para determinar el SoH de la batería.

Los métodos de estimación de SoC analizados hasta el momento, pueden ser considerados como métodos tradicionales, sin embargo, existen otros denominados métodos emergentes. Dentro de esta categoría revisaremos la estimación de SoC realizada mediante el algoritmo del filtro extendido de Kalman y la realizada mediante lógica difusa. Cada una de estas técnicas de estimación es detallada a continuación.

### **2.10.6 Filtro de Kalman (KF) para estimación de SoC**

Este filtro fue desarrollado durante el año 1960 por Rudolf Kalman, su objetivo es determinar el estado no medible de un sistema lineal a partir de mediciones de entradas y salidas reales y en un modelo en variables de estado que representa la dinámica del sistema, considerando, además, que existen perturbaciones gaussianas en los estados y en las mediciones.

Este filtro ha sido ampliamente utilizado para la determinación del estado de carga en acumuladores de energía. Para su aplicación es necesario contar con un modelo de la batería, el cual contenga al SoC como un estado. Además, es necesario que dicho modelo pueda tener una representación en variables de estado.

Generalmente los modelos para baterías son no lineales, motivo por el cual es necesario aplicar el filtro extendido de Kalman (EKF), el que consiste en aplicar KF en cada instante en torno a una linealización de primer orden del modelo.

Una de las ventajas de KF es que el estimador encontrado es insesgado y óptimo, además de que puede ser aplicado en tiempo real, y en cualquier tecnología de acumulador, sus principales desventajas se sitúan en su implementación ya que el ajuste de los parámetros R y Q se realiza gradualmente de manera empírica. Por otro lado, si el modelo utilizado es muy complejo, se puede traducir en un gran costo computacional, por lo cual el algoritmo se vuelve lento desde el punto de vista computacional.

En la tabla 2.8 se presenta un resumen de este método.

**Tabla 2.8 Resumen método filtro de Kalman**

Aplicación	Todo tipo de baterías
Principio Funcionamiento	Se aplican las ecuaciones del filtro de Kalman a un modelo de la batería representado en variables de estado
Aplicación	La estimación encontrada es óptima.
Desventajas	Asume ruido gaussiano tanto en las mediciones como en los estados

### 2.10.7 Modelación difusa para estimación de SoC

La modelación basada en lógica difusa es una poderosa herramienta para abordar problemas no lineales a partir del conocimiento de datos experimentales.

Este tipo de modelación se ha combinado con EIS para la determinación del SoC y del SoH, su principal ventaja radica en que para su implementación no se requiere un conocimiento detallado del sistema, además de que puede ser utilizado en sistemas no lineales.

Quizás su principal desventaja se debe a que para poder terminar los conjuntos difusos es necesaria una gran cantidad de datos. Este método puede ser combinado con redes neuronales dando origen a modelos híbridos denominados neuro-difusos.

La modelación difusa para la estimación del SoC puede ser utilizada directamente para determinar el SoC desde el modelo difuso, o bien puede ser combinada con el filtro de Kalman, en la cual, el modelo difuso se utiliza como ecuación de observación.

En la tabla 2.9 se presenta un resumen de este método

**Tabla 2.9 Resumen método de modelación difusa.**

Aplicación	Todo tipo de baterías
Principio Funcionamiento	Tipo caja negra
Aplicación	Tanto aplicaciones dinámicas como estáticas de la batería.
Ventajas	Para su implementación no requiere un conocimiento detallado del sistema.

Desventajas	Necesita gran cantidad de datos para determinar las reglas difusas.
-------------	---

## 2.11 Método Propuesto para la estimación de SoC.

El modelo propuesto para la estimación del SOC es presentado en [9], en ella se utiliza un algoritmo mixto, el cual representa el sistema como una planta a la cual se le realiza un control en lazo cerrado. La planta está representada por un modelo del banco de baterías el cual tiene como entrada el SOC (calculado por la integral de la corriente medida) y el voltaje del banco, y como salida el voltaje arrojado por el modelo (la planta) sea lo más parecido a medido, en otras palabras, el SoC es la variable manipulada del sistema.

La topología del modelo propuesto es la siguiente:

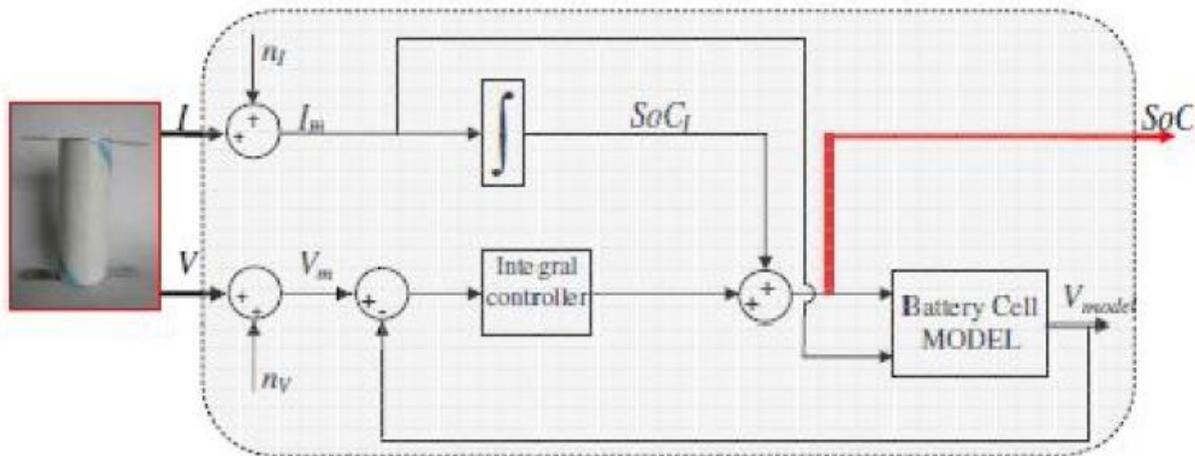


Figura 2.23 Algoritmo Mixto de estimación de SoC [9]

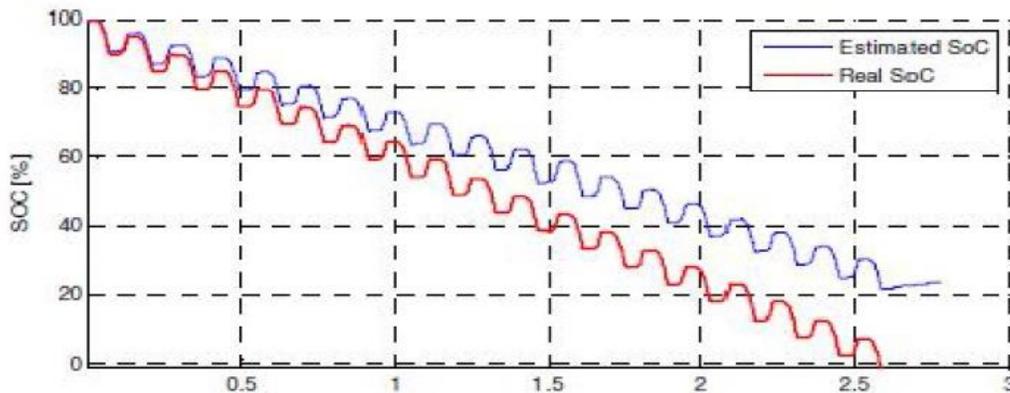
Los pasos del algoritmo son los siguientes [9]:

- Se mide el voltaje y la corriente de la celda (mediciones presenta ruido proveniente de los sensores).
- La corriente es integrada y se estima el SoC mediante la integral de la corriente (SoC1), figura 3.21.
- El modelo del banco de baterías arroja como salida el voltaje en bornes de la batería.

- Se establece un lazo cerrado de control en torno al modelo del banco de baterías, el cual viene representando a la planta del sistema de control.
- El SoC es una variable de entrada, mientras que el voltaje es la salida controlada, la referencia del sistema es la medición del voltaje del banco de baterías, la medición de corriente es considerada como una perturbación. Luego en todo este sistema se utiliza un controlador del tipo integral.
- El SoC de entrada al sistema es obtenido como la suma del SoC1, y la salida del bloque de control.
- El SoC estimado es una entrada para el modelo del banco de baterías, en el lazo de control.
- El SoC viene siendo la variable manipulada del algoritmo de control.

Lo interesante de este método es que usa el método de la integral de corriente y el método de evaluación del voltaje, juntando las ventajas de cada uno de ellos en un solo algoritmo. El método de evaluación de voltaje es usado para corregir la estimación del SoC hecho por la integral de corriente.

El método de la integral de corriente como se mencionó en capítulos anteriores es de fácil aplicación, pero tiene el problema de que, si las lecturas tienen ruido, el error se va acumulando en el tiempo, con lo cual el SoC estimado cada vez más se aleja del real. Este fenómeno se puede apreciar en la siguiente figura.



**Figura 2.24: Estimación por el método de Integral de la Corriente vs estimación real SoC [9]**

El método de la evaluación del voltaje es más complicado ya que debe contar con un buen modelo del banco de baterías, su funcionamiento se basa en medir el voltaje el cual se usa como entrada al modelo y éste arroja como salida el estado de carga del banco.

En [9] se probaron ambos métodos por separado y se llegó a las siguientes conclusiones:

- La integral de la corriente es un método bueno para dar cuenta de cambios rápido en el estado de carga, pero es muy dependiente de buenas mediciones por lo que debe necesariamente ser ajustado por otro método de estimación.
- El método de evaluación de voltaje es bueno para capturar variaciones lentas del SoC.

Luego el modelo propuesto en [9] trata de capturar las ventajas de ambos métodos, juntándoles en el algoritmo que se propone.



## Capítulo 3 Implementación del trabajo

---

### 3.1 Introducción

Como el proyecto es una continuación a trabajos previamente realizados, se pretende como primera instancia conocer todo el sistema. Esto implica tener conocimiento del uso del motor paso a paso, conocer las características del sistema de alimentación fotovoltaica instalado y tener un acercamiento a lo que es el funcionamiento del microcanal. Posteriormente a realizar estos primeros pasos se detecta la solución de implementar dos interruptores (relé) entre el panel-batería y entre la batería-motor paso a paso, sin embargo, para realizar una efectiva estimación del estado de carga es necesario obtener el modelo de la batería, y para ello se necesita implementar un sistema de adquisición de datos para obtener los valores de carga y descarga de la batería. Una vez obtenido estos datos se procede a modelar la batería, y estimar el estado de carga de la batería usando un modelo mixto presentado en el capítulo 2.

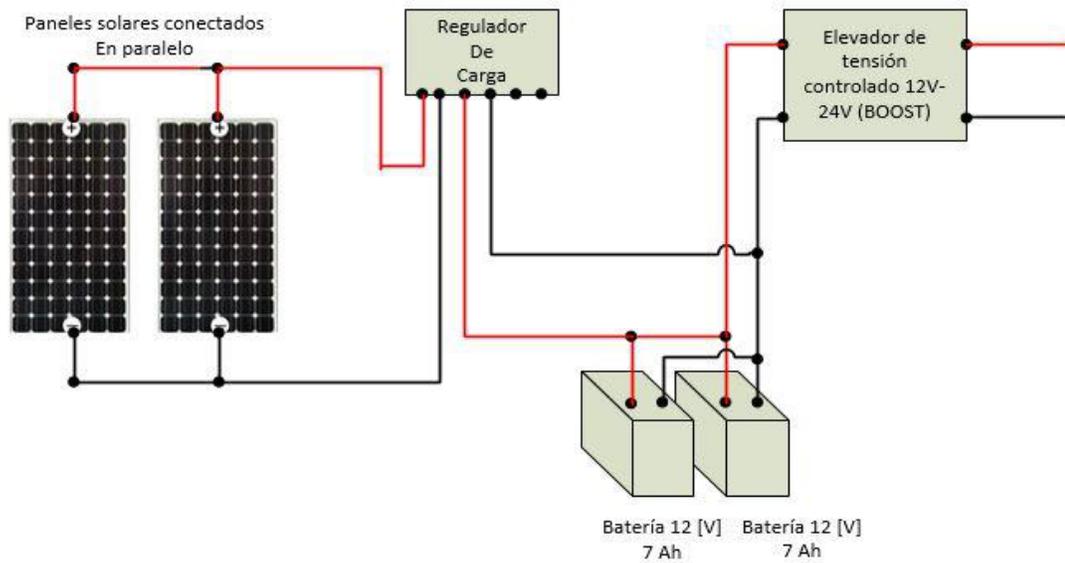
### 3.2 Trabajos Previos

#### 3.2.1 Sistema Fotovoltaico

El sistema está conformado por 2 paneles solares, un regulador de carga, un elevador de tensión 12V-24V (Boost) y dos baterías 12V/7Ah. La figura 3.1 muestra un diagrama básico de este sistema. Este sistema originalmente se diseñó para el sensor/transmisor de nivel, pero como se menciona en [19], este está sobre estimado para ese uso, por lo que es posible utilizarlo para alimentar el motor.

Los paneles solares están orientados hacia el norte con una inclinación de  $45^\circ$ , esta inclinación fue calculada en base a la latitud en la cual se montarán los paneles solares. El lugar físico donde están montados es el techo del edificio Tecnológico mecánico. La configuración utilizada para el conexionado de los paneles solares es en paralelo, con esto se logra aumentar la corriente suministrada al regulador de carga y así poder cargar más rápidamente las baterías. Se utiliza el elevador de tensión, dado que el voltaje y corriente es entregado en forma controlada, siempre el voltaje y corriente constante, así se procede a un trabajo mucho más seguro para las cargas que serán alimentadas, en nuestro caso el motor paso a paso.





**Figura 3.1. Sistema Fotovoltaico [19]**

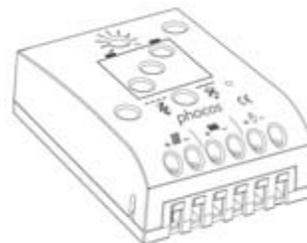
### 3.2.2 Paneles Solares

Los paneles solares utilizados tienen una potencia nominal de 20 [W] a sol nominal. Las especificaciones técnicas de los paneles se encuentran en anexo B.

### 3.2.3 Regulador de Carga

El regulador de carga (figura 3.2) protege a la batería contra posibles sobrecargas y evita que sea fuertemente descargada durante los consumos. Las características de carga comprenden diversos estados que incluyen la adaptación automática a la temperatura ambiente.

El controlador de carga se ajusta automáticamente al sistema de voltaje 12 [V] o 24 [V], también posee varias funciones de seguridad y visualización de estado de paneles solares y baterías, esto se puede apreciar en la figura 3.2.



**Figura 3.2. Regulador de carga (Phocos CML-Series 5A)**

### 3.2.4 Baterías

Las baterías utilizadas son marca ALLSAI modelo FP1270 figura 3.3, estas están montadas en paralelo como se muestra en la figura 3.1. De esta manera se logra tener el doble de capacidad de almacenamiento que, si se instalarán en serie, siendo este de 14[Ah] a 12[V].



**Figura 3.3. Batería utilizada**

### 3.2.5 Convertidor elevador de tensión (Boost)

Para ajustar la tensión obtenida del banco de baterías al nivel requerido por sensor/transmisor y el motor paso a paso se utiliza un elevador de tensión que está construido a partir del integrado UC2557-ADJ. Este convertidor es el encargado de elevar la tensión a 24 [V] controlados, con esto se puede asegurar que la tensión sea la correcta y además regulada, por lo cual el sensor/transmisor y el motor operarán en óptimas condiciones. Este dispositivo es capaz de entregar un máximo de 100 [W], que son más que suficientes para el requerimiento de potencia del sensor/transmisor y el motor. Además, cualquier sobre corriente o sobretensión generada en el sistema será asumida por el convertidor y no dañará al sensor/transmisor ni al motor, en consecuencia, en caso de falla, se tendrá que reemplazar el convertidor, que es un equipo de bajo costo en comparación con los ya mencionados, esto quiere decir que actúa también como protección.



**Figura 3.4. Elevador de tensión utilizado**

### **3.2.6 Motor paso a paso AMCI SMD23E**

El motor paso a paso cuenta con las capacidades suficientes para desempeñar distintas tareas de control, es un accionamiento viable para las soluciones de control de riego. El motor está calibrado mediante software y no físicamente como ocurre en otros equipos, ya que los parámetros de este equipo son ajustables desde el PLC.

Para este equipo es necesario que tenga una conexión a una fuente Vdc de 24V.

#### **Sus principales características:**

- Puede ser conectado a fuente dc de 24V o 48 V
- Cuenta con 130 oz-in o 0.918 Nm de torque
- Encoder integrado
- Conexión vía Ethernet al PLC
- Driver integrado
- Compatibilidad con módulo AMCI 3402 si se desea utilizar sin conexión Ethernet.



**Figura 3.5. Motor paso a paso AMCI SMD23E**

La tabla 3.1 muestra las especificaciones del motor paso a paso.

**Tabla 3.1. Especificaciones Motor paso a paso AMCI SMD23E**

Ítem	Valor
Voltaje de entrada	24-48[VDC]
Corriente máxima de entrada	3.4 [A]
Corriente DC Fuente	70[mA]@24[VDC] , 40[mA] @ 48[Vdc]
Consumo	7.68[Wh]

### 3.2.6.1 Consumo motor

Para ver el consumo del motor, medimos la corriente de salida de la batería en distintos momentos, cuando el motor estaba funcionando, pero sin moverlo, cuando estaba funcionando y moviendo la compuerta hacia arriba, y funcionando y moviendo la compuerta hacia abajo en 3 distintas velocidades. Estos valores son en un instante de tiempo.

**Tabla 3.2. Consumo motor paso a paso AMCI SMD23E**

Parámetro	Corriente
Consumo Motor Parado	0.280[A]
Consumo motor andando en velocidad 1	0.320[A]
Consumo motor andando en velocidad 2	0.412[A]
Consumo motor andando en velocidad 3	0.520[A]

De las especificaciones técnicas de los equipos a utilizar se tiene la siguiente tabla 3.3, esta medición se realizó con un ciclo de trabajo del 100%.

**Tabla 3.3 Consumo de cargas en una hora.**

<b>Equipo</b>	<b>Valor</b>
Elevador de tensión	0.6[Wh]
Regulador de carga	0.048[Wh]
Sensor/transmisor	0.8[Wh]
Motor AMCI SMD23E (detenido)	1.68[Wh]
Motor AMCI SMD23E (trabajando)	7.68[Wh]

Para analizar la duración de la batería con la instalación del relé batería-motor es necesario ver la diferencia si este elemento estuviera instalado y a la vez no lo estuviera.

Actualmente la carga se alimenta por dos baterías conectadas en paralelo por ende la capacidad del banco de baterías es de 14[Ah]. A continuación, se calcula la energía que es capaz de suministrar el banco de baterías sin utilizar el relé:

$$\text{Batería} = 14[\text{Ah}] * 12[\text{V}] = 168[\text{Wh}]$$

De los datos de la tabla 4.3 se tiene que el consumo total con el motor detenido es de 3.128[Wh] en una hora, por ende, el rendimiento del banco de baterías estará dado por:

$$\text{Duración} = \frac{168[\text{Wh}]}{3.128[\text{Wh}]} = 53.70[\text{h}] = 2.20 \text{ días}$$

Esto quiere decir que, si el panel fotovoltaico no capta energía solar, el sistema podría seguir funcionando en forma autónoma 2 días y 4,8 horas.

Si se considera que el motor está desenergizado por la acción del relé, el consumo del motor es nulo, por lo que el consumo total es de 1.448[Wh] en una hora. Luego la duración de las baterías está dada por

$$\text{Duración} = \frac{168[\text{Wh}]}{1.448[\text{Wh}]} = 116.02[\text{h}] = 4.83 \text{ días}$$

Se considera una rutina de trabajo de una hora en donde la compuerta trabaje 36 minutos, ya sea de subida o bajada, y 24 minutos esté detenido; el consumo de energía de esta rutina es de 5.528[Wh]. Si se consideran 8 horas de trabajo con la rutina anterior, con el resto de horas diarias con la compuerta detenida, el consumo total en un día de trabajo, con el motor energizado todo el tiempo, es de 94.272[Wh]. Luego la duración de las baterías está dada por

$$Duración = \frac{168[Wh]}{94.272[Wh]} = 1.78 \text{ días} = 42.77 \text{ [horas]}$$

Ahora, si se considera la rutina anterior con la acción del relé (el motor sin alimentación cuando está detenido) el consumo diario es de 59.328[Wh] por día. La duración de las baterías está dada por

$$Duración = \frac{168[Wh]}{59.328[Wh]} = 2.83 \text{ días} = 67.96 \text{ [horas]}$$

Todos estos resultados son teóricos, en el siguiente capítulo se abordará a la estimación en línea del SoC de las baterías.

### 3.2.7 Parámetros de operación.

Los parámetros de operación que fueron dispuestos para el actuador quedan reflejados en la siguiente tabla, y con ellos serán realizadas todas las experiencias prácticas en el desarrollo a lo largo de este proyecto.

**TABLA 3.4 PARÁMETROS COMPUERTA ACCIONADA POR MOTOR AMCI SMD23E**

Parámetro	Valor
Apertura máxima	72[mm]
Precisión de la compuerta	2 vueltas[configurable]
Despeque Fondo del Canal (Apertura mínima)	2[mm]

### 3.3 Hardware Instalado

El hardware que fue necesario instalar para lograr los objetivos de este trabajo fue principalmente el sistema de adquisición de datos, que contara con 2 sensores de corriente que midan la corriente de carga y descarga, un sensor de voltaje, estos 3 sensores irán comunicados a un microcontrolador Atmel de la placa Arduino, se instaló un relé programable entre el panel y la batería, y la comunicación del sistema de adquisición de datos con el controlador se realizará mediante un servidor OPC capaz de comunicar el simulink con la plataforma RsLogix5000 del software del controlador.

Luego se procederá a descargar la batería a una corriente constante sin estar conectada al panel solar, así obtendremos la curva SoC v/s Voc, esto será determinante para obtener el modelo de la

batería, y posteriormente utilizar un estimador de estados para estimar el estado de carga de la batería, finalmente esto se programará en software antes mencionado (RsLogix).

### 3.3.1 Sistema de adquisición de datos

### 3.3.2 Sensor de Corriente

El sensor de corriente que será utilizado se muestra en la figura 3.6



**Figura 3.6: Sensor LEM 55-p de corriente de efecto Hall**

Para utilizar el sensor de corriente con el microcontrolador, es necesario adaptar la señal de corriente que queremos medir, el sensor posee una proporción 1:50[mA] eso quiere decir 1:1000, por lo que tendremos que dar 25 vueltas al sensor para poder obtener datos desde los [0.200[A]-2[A]], también se tiene que tener en cuenta que los pines analógicos del Arduino pueden soportar un voltaje máximo de 5[V], en este caso lo calculamos para que reciba 3.4[V] máximo, por lo que la resistencia en serie donde se hará la medición será de 65[Ω], finalmente se tendrá un circuito de seguidor de voltaje para evitar que la fuente de corriente de la pata “M” del sensor provoque problemas al microcontrolador. El amplificador utilizado será el LM324.

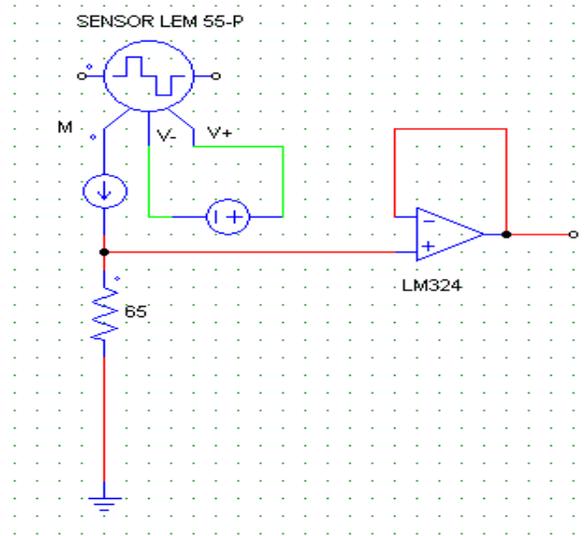


Figura 3.7. Circuito de Sensor LEM 55-P de corriente de efecto Hall

### 3.3.3 Sensores de Voltaje

Este módulo está basado en el principio de divisor de voltaje, puede hacer que el terminal de voltaje de entrada de conector “Red” a la entrada analógica sea 5 veces más pequeño, el voltaje de entrada de detección de tensión no puede ser superior a los 25[V].



Figura 3.8: Sensor de voltaje 4017

### 3.3.4 Microcontrolador

El microcontrolador utilizado será el Atmel AVR y puertos de entrada/salida. El software consiste en un entorno de desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado, el software se basa en un lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa. Se programa en el ordenador para que la placa controle los componentes electrónicos.



Figura 3.9: Arduino usado como Tarjeta de Adquisición de datos

### 3.3.5 Modulo SD Shield Data Logger

Se utilizó este módulo para la adquisición de los datos de voltajes y corrientes en las pruebas de relajación, estas variables se utilizaron para identificar los parámetros del modelo propuesto.



Figura 3.10 Módulo Data Logger

### 3.4 Esquemático Pruebas de relajación de la batería.

En la figura 3.11 se muestra el esquema de conexionado que se utilizó para descargar las baterías, se puede notar los dos sensores tanto de corriente como de voltaje, los datos son enviados a los puertos analógicos del Arduino quien mediante un programa se guarda los valores en una tarjeta SD, con la cual después se puede procesar en Excel y posteriormente en Software Matlab.

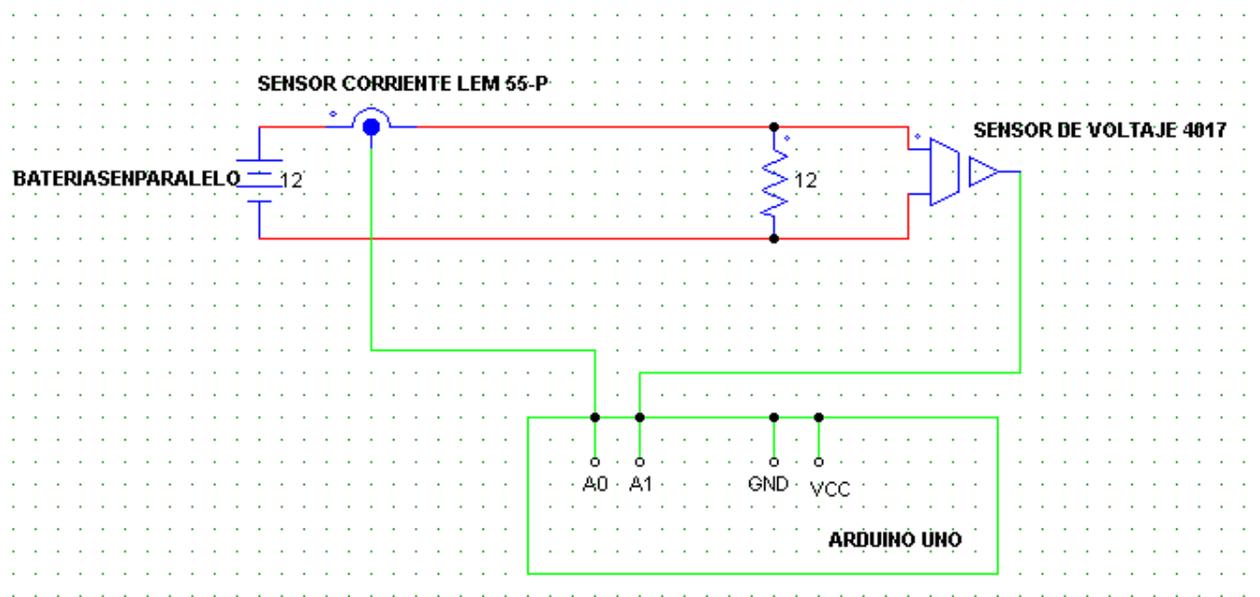


Figura 3.11: Esquemático de conexión para obtener los datos de descarga de la batería [Elaboración Propia]

### 3.5 Esquema Conexionado Estimación en línea de estado de carga

En la figura 3.12 se muestra el esquema del conexionado para estimar en línea el estado de carga, en este esquema se puede apreciar los dos sensores de Corriente LEM, uno conectado desde los paneles al regulador que posteriormente carga a la batería, y el otro conectado de las baterías al motor, finalmente un sensor de voltaje que está monitoreando en todo momento el voltaje en bornes de la batería. Todos estos sensores irán conectados al Arduino Mega2560 el que por medio de comunicación serial se envían los datos a Matlab/Simulink, para realizar la estimación.

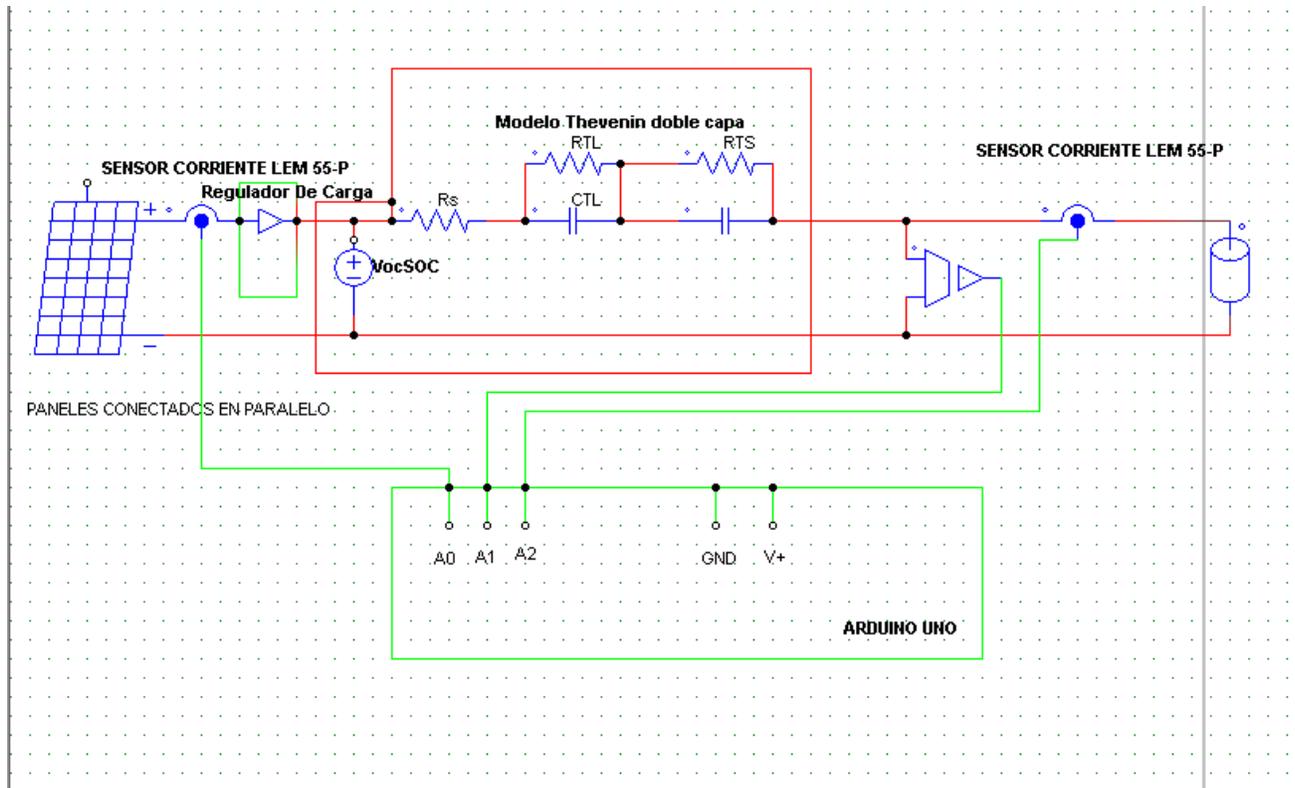


Figura 3.12 Esquema conexionado Estimación en línea de Estado Carga [Elaboración Propia]

### 3.6 Comunicación Arduino-Simulink-PLC

La adquisición de datos por parte de arduino son enviados hacia el software Matlab/Simulink donde se procede a estimar en línea el estado de carga de la batería, posteriormente a eso por medio de un servidor OPC creado por el software RsLinxGateway se envían los datos estimados al software RsLogix5000 de los controladores Allen-Bradley.

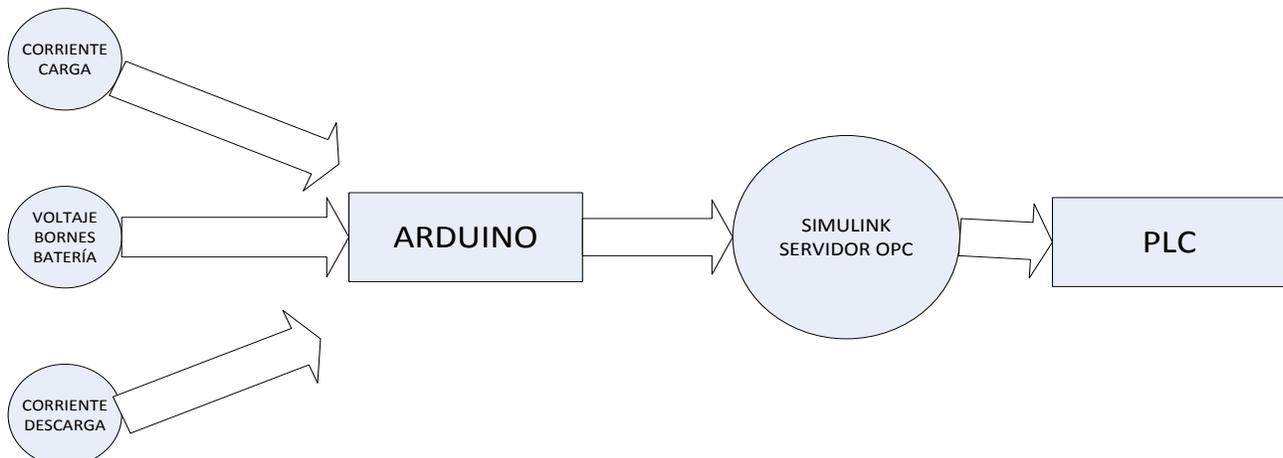


Figura 3.13: Esquema comunicación Sensores- Arduino-Simulink-OPC-PLC [Elaboración Propia]

### 3.7 P&ID estimación de SoC.

En la figura 3.14 se muestra el diagrama de instrumentación utilizado para estimar el SoC en línea, en donde los sensores van comunicados al PLC y los actuadores son los dos relés instalados.

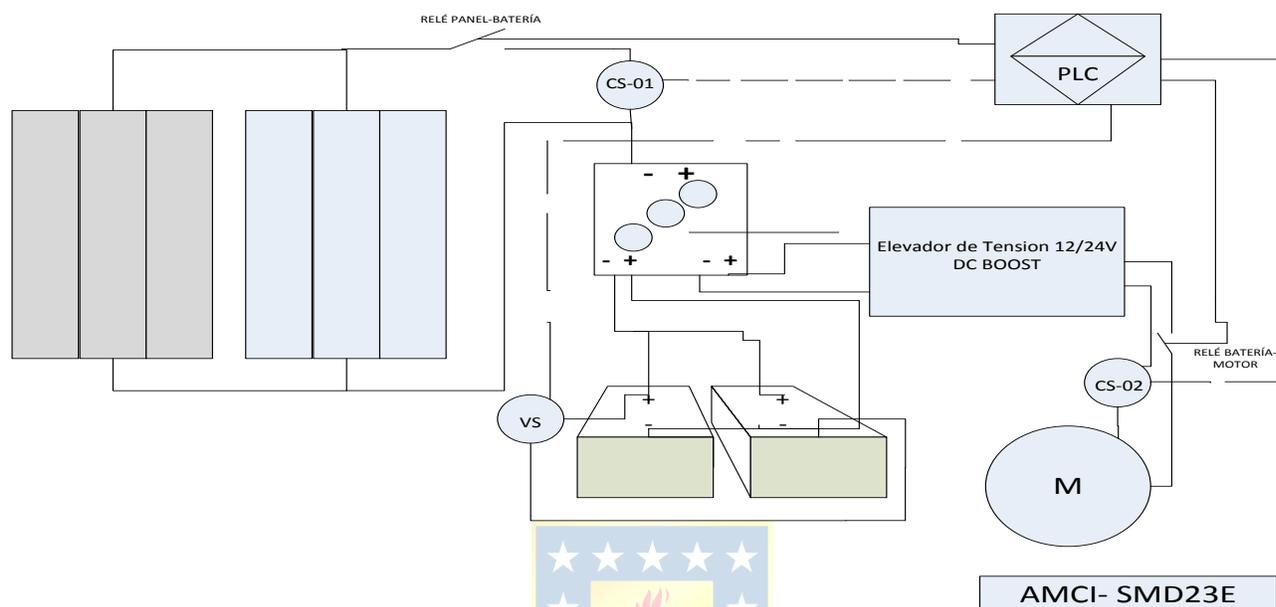


Figura 3.14: P&ID estimación de SoC

### 3.8 P&ID planta piloto microcanal

En la figura 3.15 se presenta el diagrama de instrumentación que representa la planta piloto microcanal del Laboratorio de Control Automático del Departamento de Ingeniería eléctrica de la Universidad de Concepción.

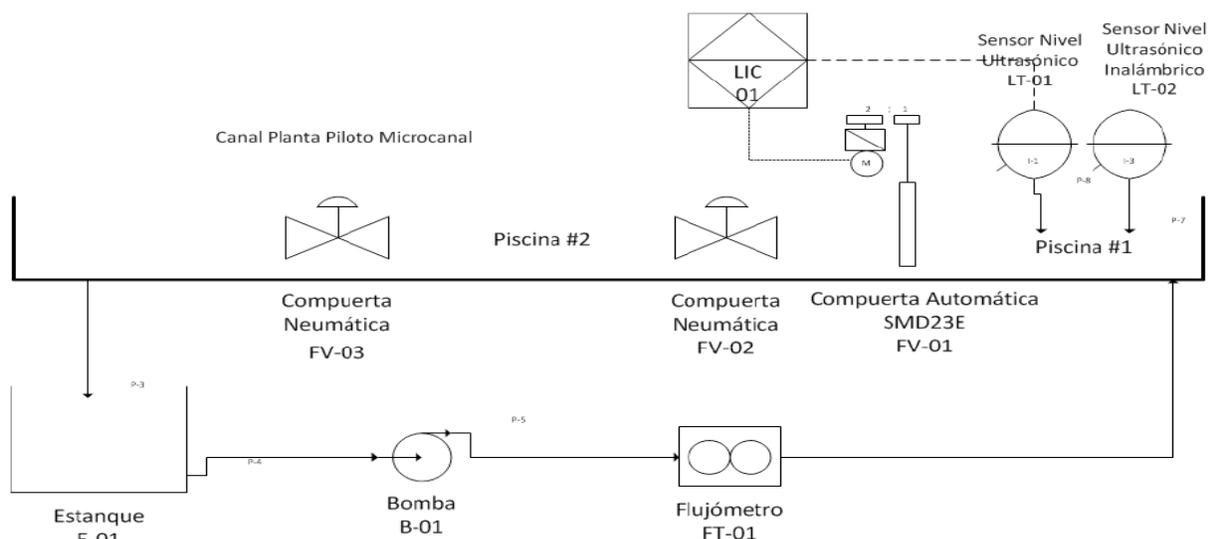


Figura 3.15: P&ID planta piloto microcanal

### 3.9 Modelo de batería.

En este trabajo se ocupa el modelo de Thevenin, el cual es presentado en la figura 3.16

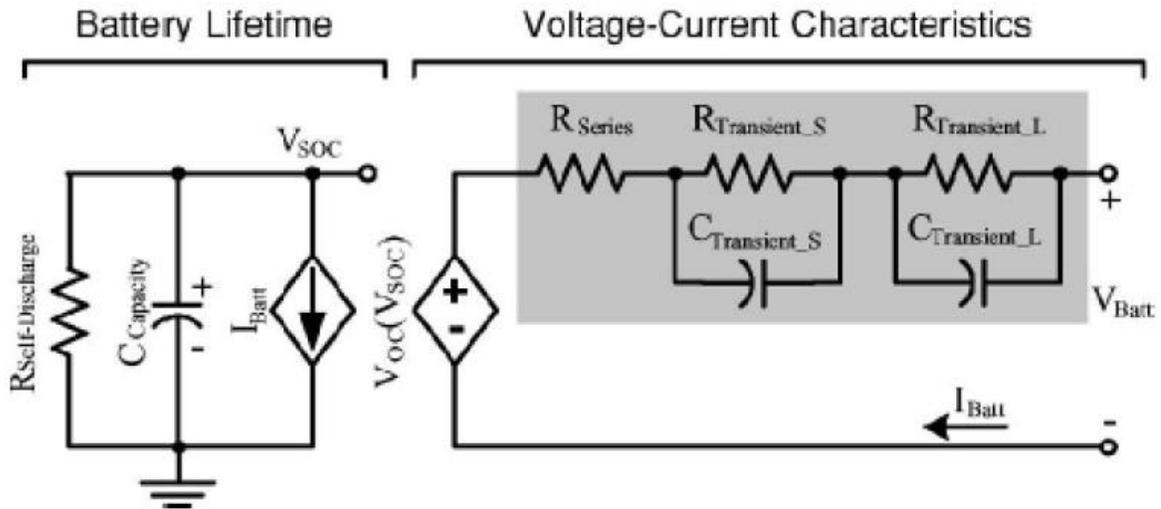


Figura 3.16 Modelo de Thevenin [9]

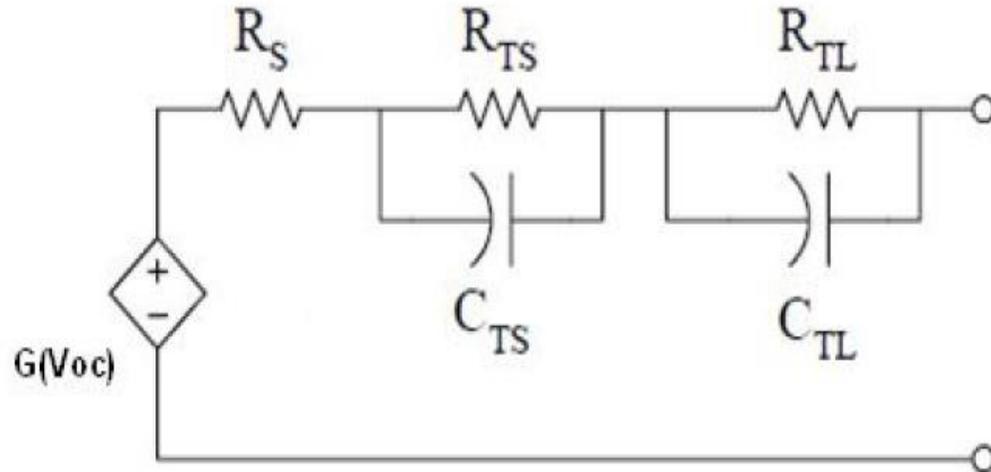
El modelo consta de dos circuitos separados, los cuales se vinculan mediante una fuente de voltaje controlado por voltaje y una fuente de corriente controlada por corriente.

El primer circuito representa la capacidad general de la batería mientras que el segundo circuito modela la resistencia interna y el comportamiento transiente de la batería.

La fuente de voltaje representa la relación no lineal existente entre el estado de carga (SoC) y el voltaje de circuito abierto (VOC).

La resistencia de auto descarga (resistencia en paralelo a  $C_{capacity}$ ), modela el desgaste que sufre el banco en su ciclo de vida.

Para nuestro caso de uso el tiempo de vida del banco de baterías no es un parámetro relevante por éste motivo se omite el circuito que da cuenta de este fenómeno.



**Figura 3.17 Modelo de Thevenin sin considerar tiempo de vida útil del banco de baterías. [9]**

Donde

- $R_{TS}$  y  $C_{TS}$  corresponden a la resistencia y capacitancia en corto tiempo.
- $R_{TL}$  y  $C_{TL}$  corresponden la resistencia y capacitancia en el largo tiempo.
- $R_S$  representan la resistencia serie
- $G(VoC)$  representan la relación no lineal entre el SoC y el voltaje de circuito abierto (VoC)

Por otro lado, sea:

$U_1$ : Voltaje en  $C_{TS}$

$U_2$ : Voltaje en  $C_{TL}$

Las ecuaciones que rigen las variables antes mencionadas son las siguientes:

$$\frac{dU_1}{dt} = -\frac{U_1}{R_{TS}C_{TS}} - \frac{I}{C_{TS}} \quad (3.1)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = -\frac{U_2}{R_{TS}C_{TL}} - \frac{I}{C_{TL}} \quad (3.2)$$

El voltaje en los bornes de la batería está dado por:

$$y = G(VoC) + U_1 + U_2 + R_S I \quad (3.3)$$

La respuesta de entrada cero del sistema antes presentado, es la siguiente:

$$y(t) = G(Voc(0) + U_1(0)e^{-\frac{1}{R_{TS}C_{TS}}t} + U_2(0)e^{-\frac{1}{R_{TL}C_{TL}}t} \quad (3.4)$$

Esta ecuación puede ser reescrita en el dominio de la frecuencia usando la transformada de Laplace.

$$V = V_{oc}(SoC) - \left[ R_0 + \frac{R_{TS}}{1+sR_{TS}C_{TS}} + \frac{R_{TL}}{1+sR_{TL}C_{TL}} \right] \quad (3.5)$$

Luego en base a esta ecuación es posible determinar de forma experimental los parámetros del modelo circuital, la forma de hacerlo se explica a continuación.

### 3.9.1 Curva Voc v/s SoC

Para determinar la relación no-lineal existente entre el estado de carga del banco de baterías y el voltaje en vacío se utiliza el método mostrado en [6], el cual se basa en realizar una descarga del banco a corriente constante 1[A], la descarga se realiza a intervalos uniformes de tiempo, con el fin de determinar la carga extraída en cada intervalo. Al final de cada ciclo se deja reposar el banco por 30 minutos, luego de los cuales se mide el voltaje en bornes, el cual puede ser interpretado por (Voc) del banco. Al final de la descarga se tiene una serie de puntos de carga extraída y voltaje en vacío los cuales representan la relación entre SoC y VoC.

### 3.9.2 Resistencia Serie

En [9] se describe este método, el cual establece que al final de un periodo de descarga a corriente constante, realizado al banco de baterías, se debe medir la diferencia de potencial en bornes de este, instante que es interpretado como  $t^-$ , inmediatamente después, se desconecta la carga y rápidamente se procede a medir el voltaje en bornes de las baterías instante que es interpretado como  $t^+$  con estos valores se determina la resistencia serie como sigue

$$R_s = \frac{y(t^-) - y(t^+)}{i_c} \quad (3.6)$$

$i_c$ , representa la corriente de descarga.

### 3.9.3 Parámetros Constantes de tiempo RC

La determinación de los parámetros RC presentes en el modelo de Thevenin, se determinan en base a las curvas de relajación del banco, es decir en estados de reposo del mismo. Se determinan experimentalmente curvas de relajación, a distintos estados de carga, de las cuales se obtienen los parámetros antes mencionados.

La ecuación 3.4 se puede reescribir como sigue:

$$y = k + ae^{bt} + ce^{dt} \quad (3.7)$$

Notar que esta ecuación rige el comportamiento del banco de baterías, estando en reposo, es decir sin sacarle y/o inyectarle carga.

Luego para cada curva de relajación se procede a determinar los coeficientes k,a,b,c,d que representen dicha curva, por lo cual para cada una de las curvas de relajación se determinan sus respectivos coeficientes k,a,b,c y d, luego se procede a sacar un promedio de cada uno de ellos y se procede a determinar los valores de las resistencias y las capacitancias.

Para la determinación de los coeficientes de la ecuación 3.7 se utilizó el toolbox de Matlab Curve Fitting Toolbox.

En [9] se realiza este análisis y se llegan a las siguientes expresiones para los elementos de los filtros RC.

$$R_{TS} = -\frac{a}{i_c} \quad (3.8)$$

$$R_{TL} = -\frac{c}{i_c} \quad (3.9)$$

$$C_{TS} = -\frac{1}{R_{TS}b} \quad (3.10)$$

$$C_{TL} = -\frac{1}{R_{TL}d} \quad (3.11)$$

## 3.10 Modelación y Control Microcanal

### 3.10.1 Modelo Primer Orden con Retardo de la Planta.

La función de transferencia de un modelo de primer orden con retardo es la siguiente:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = K_{planta} \frac{e^{-(\theta s)}}{\tau s + 1} \quad (3.12)$$

A continuación, se aplica la transformada de Laplace inversa en la ecuación (3.12):

$$\tau \cdot y(t)' + y(t) = u(t - \theta) \cdot K_{planta} \quad (3.13)$$

$$y(t)' + \frac{1}{\tau} \cdot y(t) = \frac{K_{planta}}{\tau} \cdot u(t - \theta) \quad (3.14)$$

En la ecuación (3.14) se encuentra en el dominio del tiempo continuo, pero se debe recordar que, en la práctica, se enfrenta a sistemas discretos. Es por esta razón que se discretiza esta función continua ya que así se podrá obtener los parámetros de la planta una vez realizada las pruebas y obtención de resultados.

$$\frac{[y(k) - y(k-1)]}{T} + \frac{1}{\tau} \cdot y(k) = \frac{K_{planta}}{\tau} \cdot u(k - \theta_{discreto}) \quad (3.15)$$

$$y(k) = \left[ \frac{T}{T + \tau} \right] \cdot K_{planta} \cdot u(k - \theta_{discreto}) + \left[ \frac{\tau}{T + \tau} \right] \cdot y(k - 1) \quad (3.16).$$

Asumiendo que

$$\beta = \left[ \frac{T}{T + \tau} \right] \cdot K_{planta} \quad (3.17)$$

$$\alpha = \frac{\tau}{T + \tau} \quad (3.18)$$

Luego de deducir el modelo discreto de una planta de primer orden con retardo, nuestro próximo desafío es encontrar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  ya que con ellos se podrá obtener sus equivalentes continuos y con esto poder realizar la simulación de la planta y posteriormente del controlador que deseamos implementar. Para encontrar los valores de los parámetros debemos encontrar algún método que nos permita obtener dichos parámetros. El método que se propone en primera instancia es el de mínimos cuadrados y a continuación realizaremos la demostración matemática del método que en el futuro trabajo se utilizará en el software Matlab

### 3.10.2 Método Mínimos Cuadrados

$$\begin{bmatrix} y(\theta_{discreto} + 1) \\ y(\theta_{discreto} + 2) \\ y(\theta_{discreto} + 3) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} = \beta \cdot \begin{bmatrix} u(1) \\ u(2) \\ u(3) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ u(N - \theta_{discreto}) \end{bmatrix} + \alpha \cdot \begin{bmatrix} y(\theta_{discreto}) \\ y(\theta_{discreto} + 1) \\ y(\theta_{discreto} + 2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y(N - 1) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Definimos como:

$$Y = \begin{bmatrix} y(\theta_{discreto} + 1) \\ y(\theta_{discreto} + 2) \\ y(\theta_{discreto} + 3) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}, \quad \sigma = \begin{bmatrix} u(1) & y(\theta_{discreto}) \\ u(2) & y(\theta_{discreto} + 1) \\ u(3) & y(\theta_{discreto} + 2) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ u(N - \theta) & y(N - 1) \end{bmatrix}, \quad \rho = \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Por lo que el sistema (3.19) queda definido por la siguiente ecuación

$$Y = \sigma \cdot \rho \quad (3.21)$$

Este resultado nos recuerda que la finalidad con que desarrollamos esta ecuación 3.21 es para encontrar el vector  $\rho$  que contiene los parámetros que buscamos. Por lo que es necesario utilizar operaciones por matrices tal que:

$$\rho^{\rightarrow} = [\sigma' \cdot \sigma]^{-1} \cdot \sigma' \cdot Y \quad (3.22)$$

A partir de lo anterior se deduce los parámetros continuos de la planta de primer orden con retardo:

**Tabla 3.5 Parámetros de la planta continua**

Parámetro	Valor
$K_{planta}$	1.7708%
$\tau$	20.733[seg]
$\theta$	7[seg]

### 3.11 Control planta piloto microcanal

Dentro de los objetivos propuestos, se tiene que se quiere implementar algún tipo de control con el cual podamos controlar el nivel con el actuador en la planta piloto Microcanal. Es por esto que se colocan las bases con las cuales podremos aplicar alguna técnica de control que nos permita cumplir este objetivo.

#### 3.11.1 Ecuación Controlador PI discreto

En esta parte del trabajo se muestra el desarrollo de la ecuación de un controlador PID discreto. En el presente trabajo se ha decidido utilizar un controlador PI, pero esto no implica que sea la solución que mejor se ajuste.

La ecuación que describe un PID continuo es:

$$u(t) = K_c \cdot [e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}] \quad (3.23)$$

Con

$$e(t) = SP(t) - PV(t) \quad (3.24)$$

Aplicando la T.L a la ecuación 3.24

$$u(s) = K_c \cdot [1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s] \quad (3.25)$$

Discretizando la ecuación 3.25

$$u(k) = K_c \left[ e(k) + \frac{T_0}{T_i} \cdot \left[ \frac{e(k)+e(0)}{2} + \sum_{i=0}^{k-1} e(i) \right] + \frac{T_d}{T_0} \cdot [e(k) - e(k-1)] \right] \quad (3.26)$$

$$u(k) = K_c \left[ e(k) + \frac{T_0}{T_i} \cdot \left[ \frac{e(k) + e(0) + 2e(k-1)}{2} + \sum_{i=1}^{k-2} e(i) \right] + \frac{T_d}{T_0} \cdot (e(k) - e(k-1)) \right]$$

$$u(k-1) = K_c \cdot [e(k-1) + \frac{T_0}{T_i} \cdot \left[ \frac{e(0) + e(k-1)}{2} + \sum_{i=1}^{k-2} e(i) \right] + \frac{T_d}{T_0} \cdot [e(k-1) - e(k-2)]] \quad (3.27)$$

Si realizamos  $u(k) - u(k-1)$  tenemos que:

$$\Delta u(k) = K_c \left( 1 + \frac{T_0}{2T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right) e(k) + K_c \left( -1 + \frac{T_0}{2T_i} - \frac{2T_d}{T_0} \right) e(k-1) + K_c \left( \frac{T_d}{T_0} \right) e(k-2) \quad (3.28)$$

Considerando:

$$q_0 = K_c \left( 1 + \frac{T_0}{2T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right) \quad (3.29)$$

$$q_1 = K_c \left( -1 + \frac{T_0}{2T_i} - \frac{2T_d}{T_0} \right) \quad (3.30)$$

$$q_2 = \frac{K_c T_d}{T_0} \quad (3.31)$$

Se tiene que el controlador discreto es

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (3.32)$$

Esta ecuación que se presenta en 3.32 es importante, ya que esta ecuación es la que incluye el algoritmo de control que será implementado en el PLC que cuenta el microcanal. Si bien se tiene ésta ecuación solo resta calcular los parámetros del controlador, y se aplicará directamente al algoritmo que calcula la acción de control que deberá realizar la compuerta.





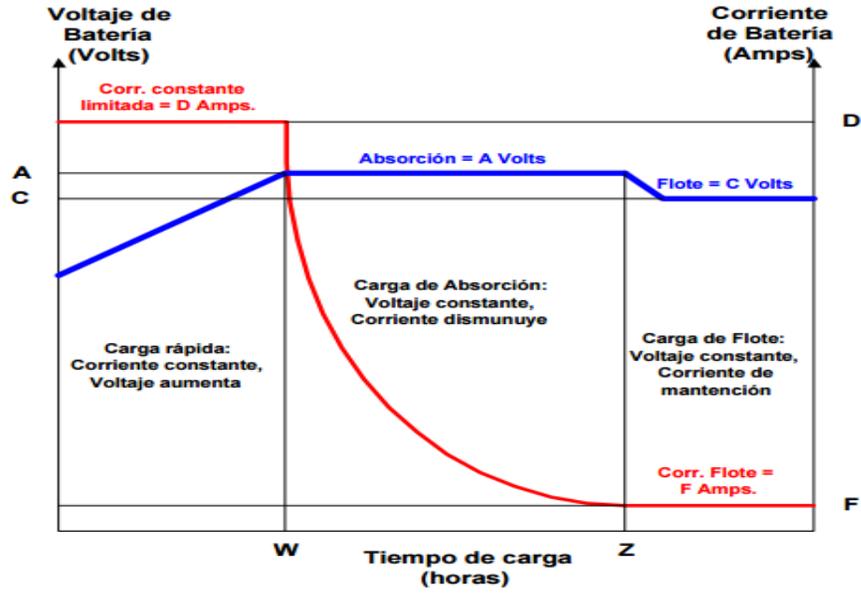


Figura 4.1: Algoritmo de carga de tres etapas

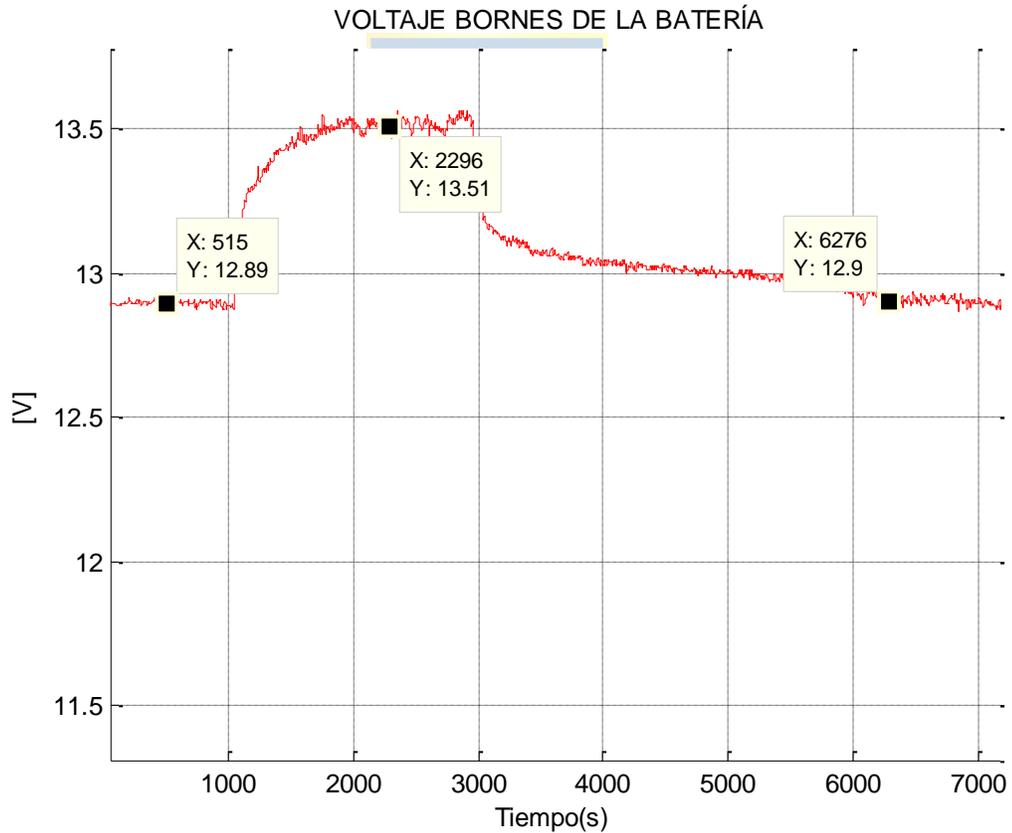


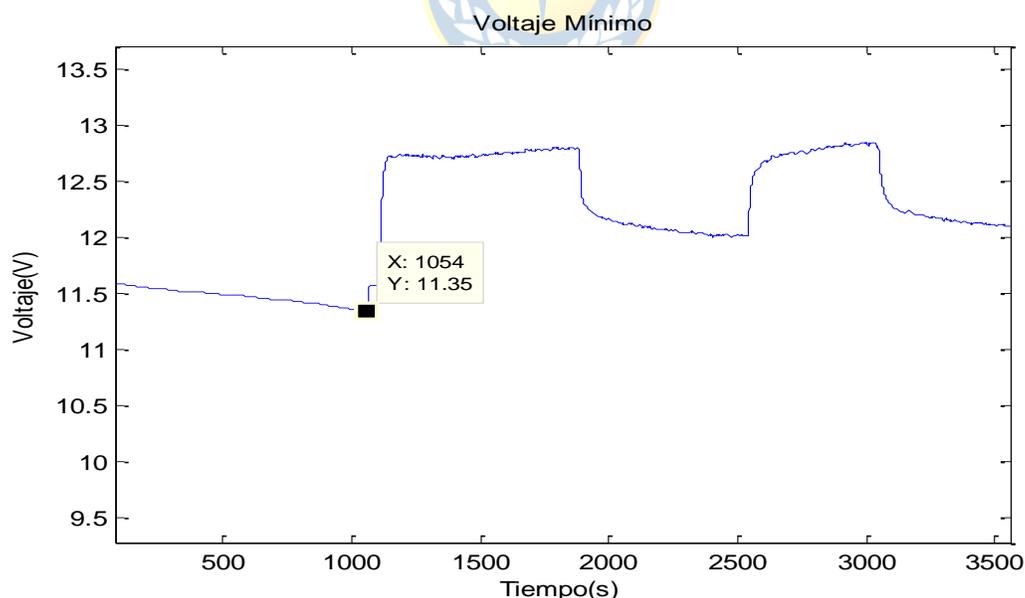
Figura 4.2: Evolución Voltaje bornes batería

De acuerdo a lo analizado en la figura 4.2, se decidió estimar el 100% a los 13[V] en acorde a lo indicado por el fabricante de la batería y al funcionamiento del regulador de carga, a este valor el voltaje en bornes de batería se queda estabilizado.

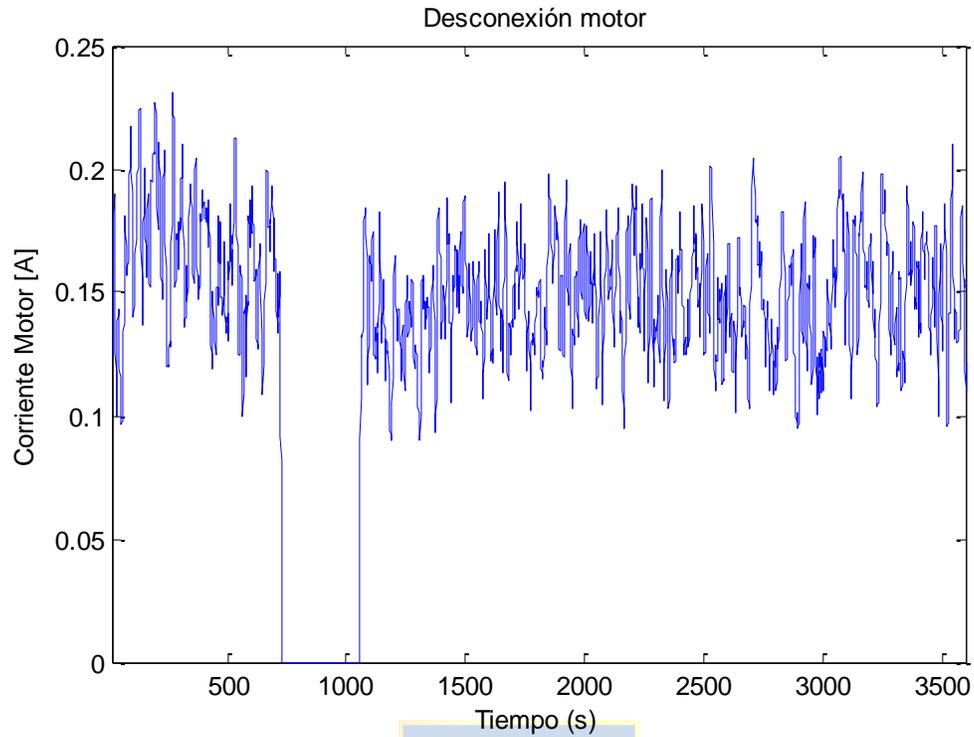
Por otro lado, para encontrar el 0%, fue necesario previamente descargar el banco de baterías a 11.6[V]. Con 11.6 [V] operando y utilizando el motor, se verá en que momento el regulador de carga cortará la conexión, en este caso el regulador cortó la conexión de las baterías de forma automática los 11.4[V] para prevenir problemas de descargas profunda, esto se demuestra en la figura 4.3.a, por lo tanto, el voltaje que se usa para el 0% es de 11.4[V].

De esta manera se puede controlar el SoC en el caso que las baterías estén descargadas, y conectar los paneles solares para prevenir que el microcanal quede sin control y evitar una descarga profunda por parte de las baterías.

En la siguiente figura 4.3a, se muestra cuando el voltaje en bornes llega a los 11.4 [V], y el regulador se encarga de desconectar el proceso de descarga, esto se ve reflejado en la figura 4.3.b donde las baterías cuando llega a los 11.4 [V] realiza la desconexión del motor , posteriormente a eso se conecta los paneles solares y se aprecia que el voltaje sube rápidamente hacia nuestro 90% aproximadamente de voltaje, y luego, con el motor conectado, se procede a desconectar los paneles y ver como se produce una auto descarga, esto es debido a que se deja de inyectarle corriente.

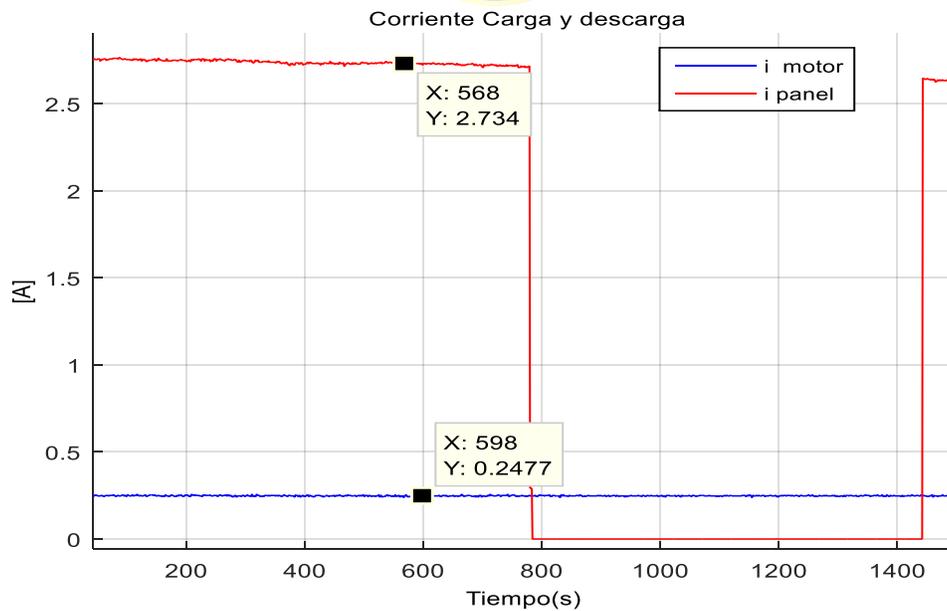


**Figura 4.3.a: Comportamiento voltaje mínimo.**



**Figura 4.3.b: Comportamiento Consumo Motor.**

En la figura 4.4 se ve la corriente proveniente de los paneles solares en el proceso de carga, el valor es cercano a los 2.5[A] en este caso ya que la carga se realizó en horas de un día con bastante irradiación.



**Figura 4.4: Corriente proveniente Panel solar.**

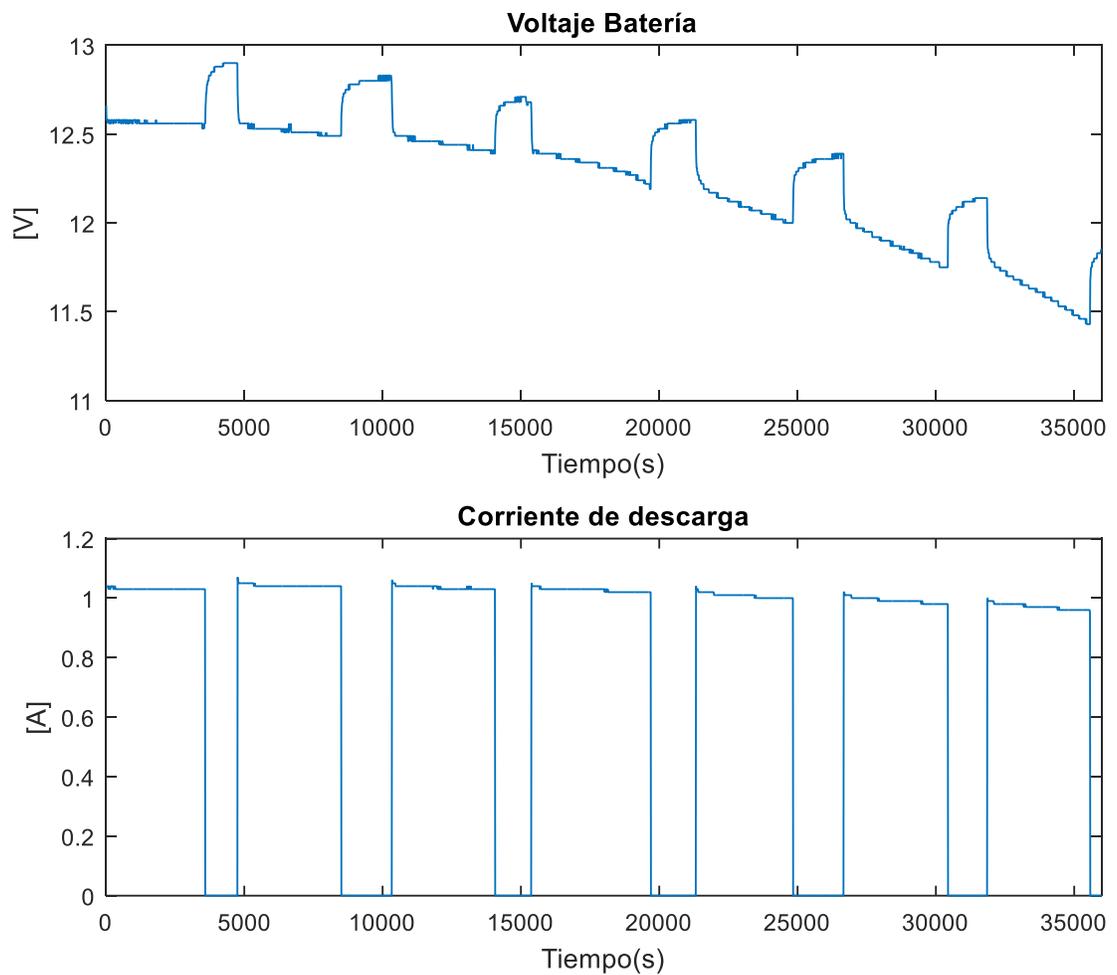
En la figura 4.4 el muestreo se inició cuando comenzó la carga, anteriormente a eso la corriente del panel era 0[A] y la corriente del motor era la misma que la indicada en la figura 4.4, 0.24[A].

Entendiendo como se comporta el sistema instalado es posible indicar los límites de operación en los que podremos controlar el estado de carga del banco de baterías.

### 4.3 Resultados Pruebas de relajación y obtención de parámetros.

Para empezar, se cuantificó el desempeño del modelo de Thevenin en el banco de baterías ALLSAI modelo FP1270.

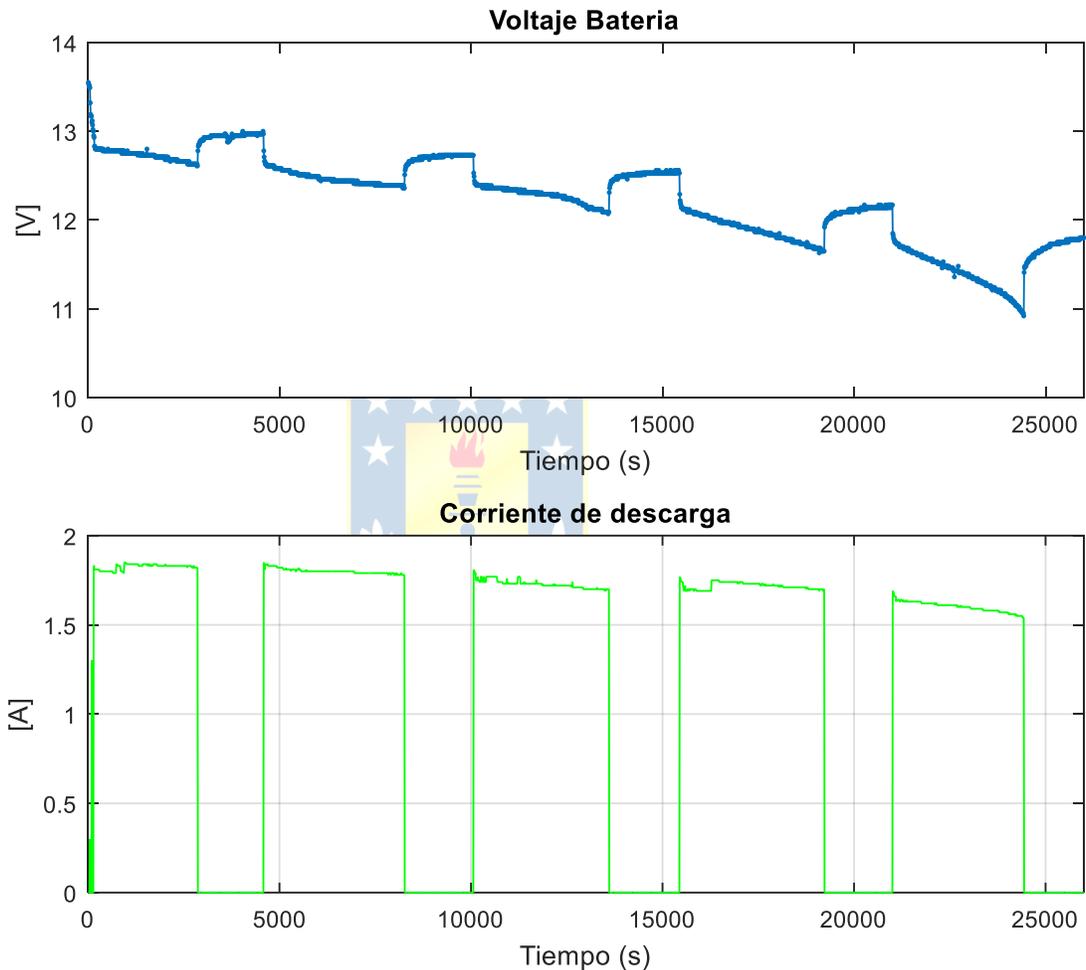
Se realizaron dos descargas, una de 1.1 Ah con reposo de 30 minutos, y otra de 1.8 Ah con reposos de 30 minutos, los resultados se obtienen a continuación.



**Figura 4.5 Resultados Pruebas de relajación a) Voltaje batería. b) Corriente de descarga**

En la figura 4.5-a se muestran la evolución del voltaje del banco de baterías mediante una descarga constante de 1.1[A] por periodos de una hora, y de reposo de 30 minutos, se decide reposarlo durante media hora ya que es el tiempo necesario para que la batería obtenga su voltaje de circuito abierto. Se obtienen 6 periodos de reposo.

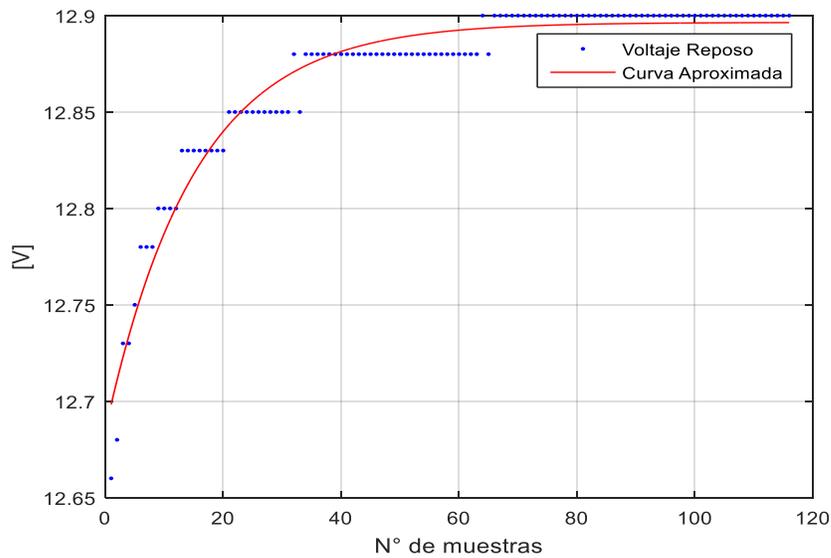
En la figura 4.5-b se nota una tendencia a que la corriente disminuye junto con el voltaje en bornes, esto sucede ya que la carga usada es una resistencia constante de 12[Ω].



**Figura 4.6 Resultados Pruebas de relajación a) Voltaje batería. b) Corriente de descarga**

En la figura 4.6-a se muestra la evolución del voltaje en bornes del banco de baterías realizado a una corriente de 1.8 [A] con reposos de media hora. En este caso solo se obtienen 4 zonas de reposo debido a que se le aplica mayor corriente.

Para la obtención de los parámetros se utilizó el CF Toolbox de Matlab, y se procede a promediar los 6 valores de relajación.

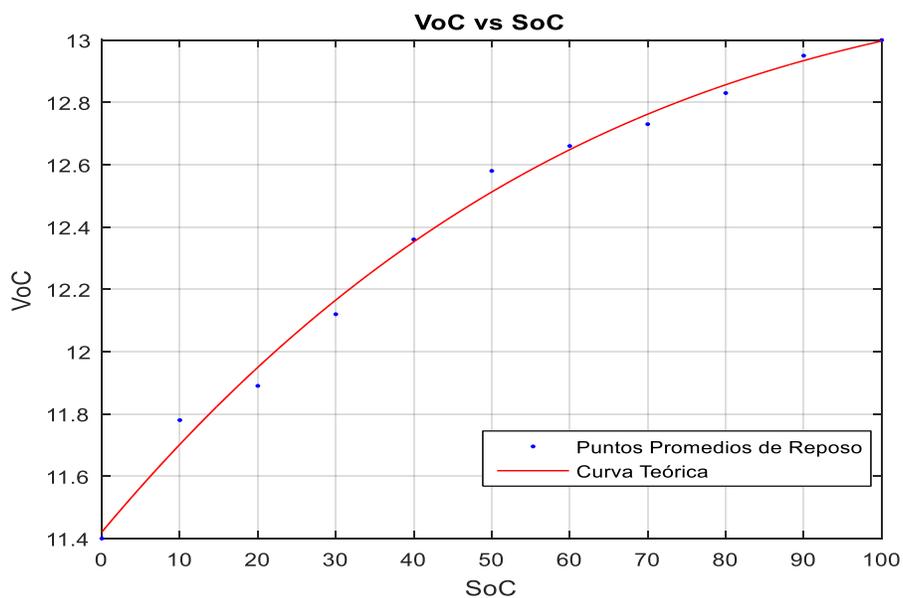


**Figura 4.7: Aproximación necesaria para identificar parámetros.**

En la figura 4.7 se muestra la curva aproximada con respecto a los puntos de el voltaje en circuito abierto, estos puntos se toman desde que las baterías se pusieron en reposo, hasta antes de conectar la carga. Esto se hizo para las demás curvas de reposo. De esta manera se obtuvo los parámetros.

#### 4.4 Curva SoC vs VoC

Al tener las pruebas de relajación, y definidos los máximos y mínimos es posible tener la curva SoC v/s Voc. Esta se muestra en la siguiente figura.



### Figura 4.8: Curva aproximada Voc vs Soc

La curva teórica es una aproximación lineal de 3er orden. La función obtenida es:

$$V_{oc}(SoC) = -0.0001818 * SoC^3 + 0.02992 * SoC^2 + 4.021 * 10^{-7} * SoC + 11.42 \quad (4.1)$$

### 4.5 Simulación modelo mixto

Primero en la tabla 4.1 se muestran los valores de los parámetros del modelo de Thevenin de Capa doble.

Los resultados fueron los siguientes

**Tabla 4.1 Valores de los parámetros del modelo de Thevenin de capa doble.**

Parámetro	Valor
$R_{TS}$	0.1437[Ω]
$C_{TS}$	298.67[F]
$R_{TL}$	0.21166[Ω]
$C_{TL}$	12.94[F]
$R_S$	0.16[Ω]

Se realizó la simulación en el software Simulink, para ver el funcionamiento del algoritmo mixto.

Para simular los datos obtenidos reales, se tuvo que discretizar el modelo. En Laplace tenemos la siguiente función:

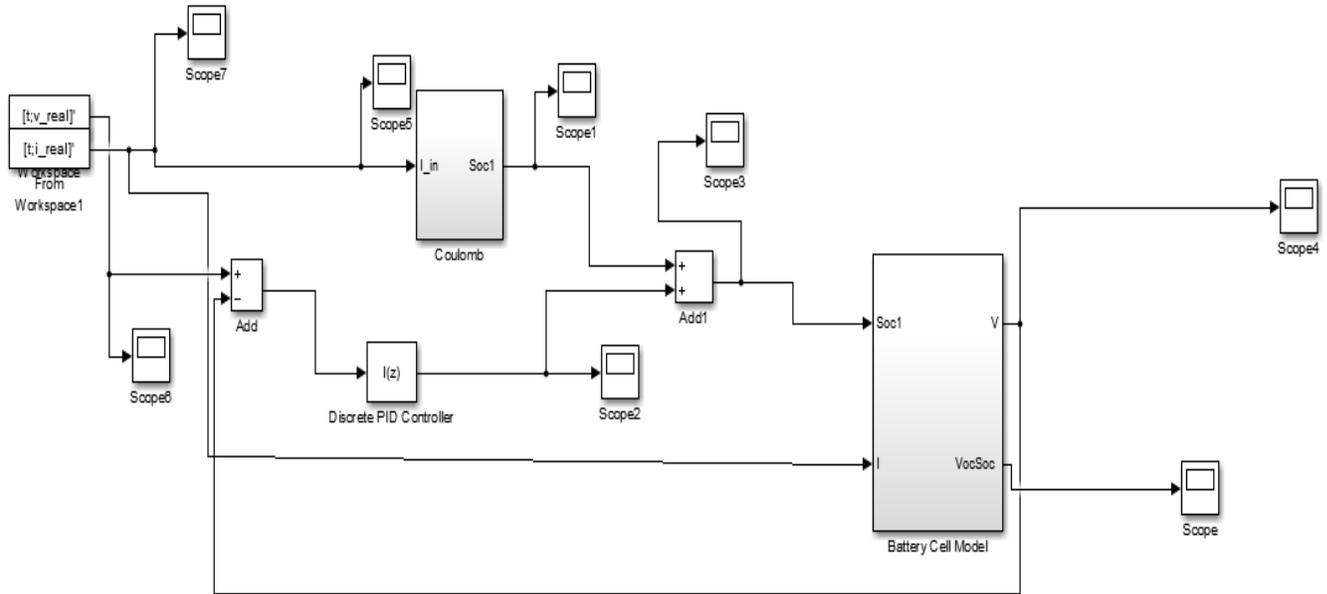
$$V = V_{oc}(SoC) - R_0 I - \left( K \left( \frac{R_1}{1 + sR_1C_1} + \frac{R_2}{1 + sR_2C_2} \right) \right) I \quad (4.2)$$

Aplicando la transformada Z

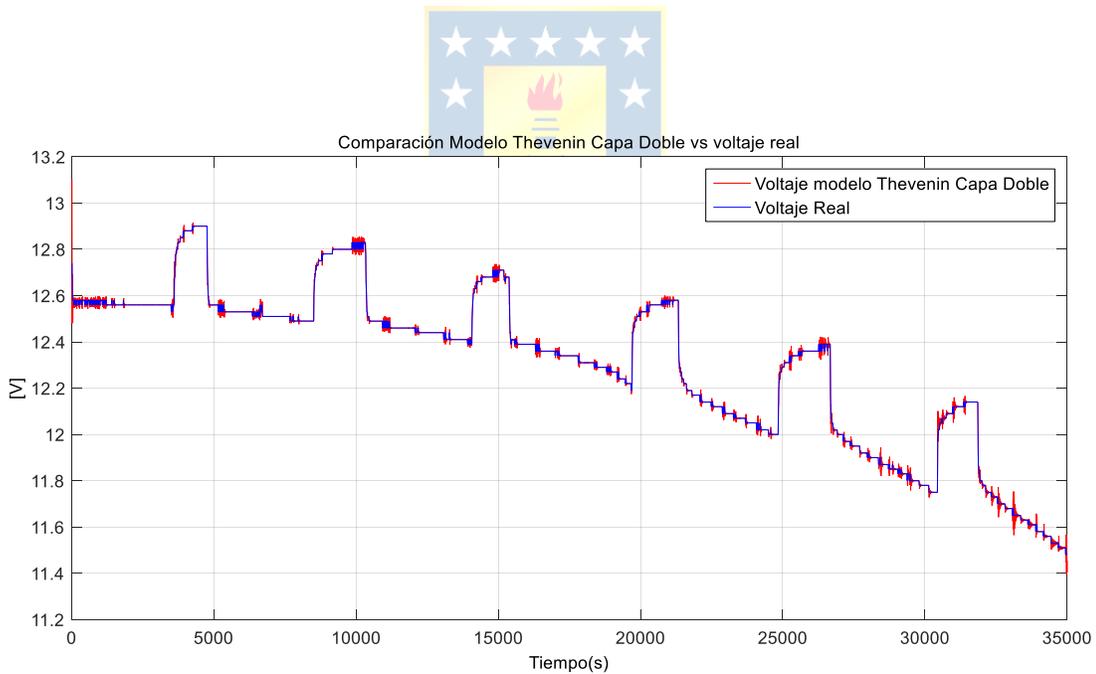
$$Z\{V\} = Z\{V_{oc}(SoC) - R_0 I - \left( K \left( \frac{R_1}{1 + sR_1C_1} + \frac{R_2}{1 + sR_2C_2} \right) \right) I\} \quad (4.3)$$

$$V = V_{oc_k}(SoC_k) - R_0 I_k - \left( K * \left( \frac{1}{C_1} * \frac{1}{1 - e^{-\left(\frac{1}{R_1 C_1}\right)t} Z^{-1}} + \frac{1}{C_2} * \frac{1}{1 - e^{-\left(\frac{1}{R_2 C_2}\right)t} Z^{-1}} \right) \right) \quad (4.4)$$

De esta forma es posible implementar el modelo en Simulink como se muestra en la figura

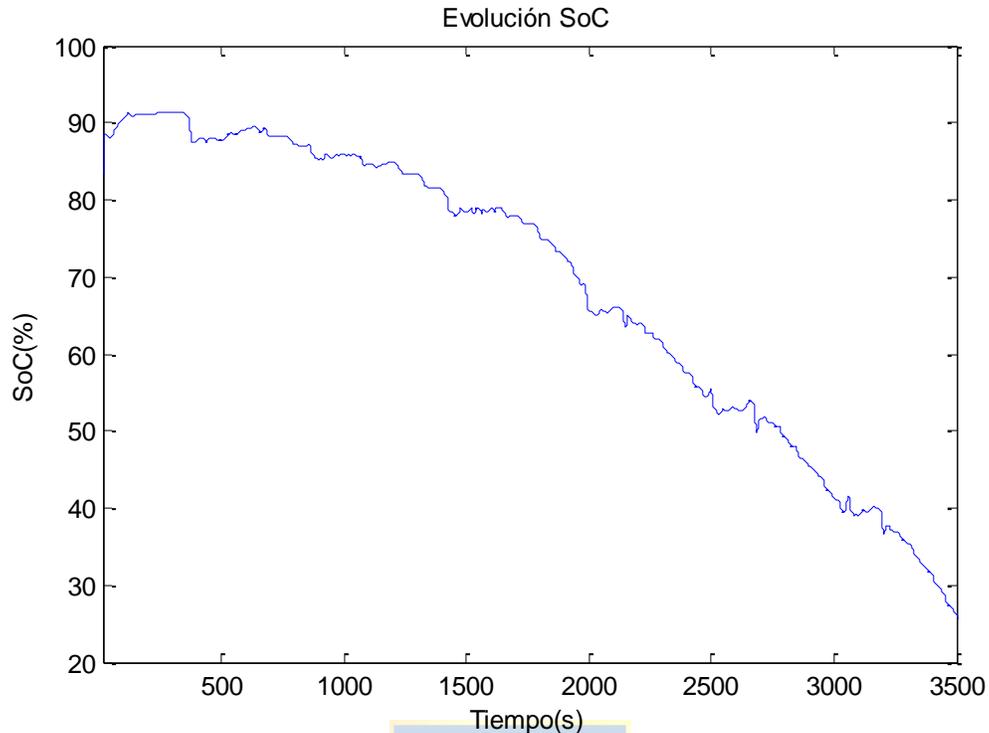


**Figura 4.9: Simulink Discreto**



**Figura 4.10: Voltaje Entrada real vs voltaje estimado por modelo de Thevenin Capa doble**

En la figura 4.10 se muestran los resultados de la simulación del modelo de Thevenin de Capa doble con los valores de los parámetros obtenidos, se puede ver que sigue la referencia de forma precisa, obtenido el modelo se procede a hacer la estimación en línea del SoC.



**Figura 4.11: Evolución SoC estimado por el método**

En la figura 4.11 se muestra la evolución simulada del SoC, que da cuenta que el modelo cumple con los requisitos para poder ser implementado, se puede ver que comienza desde cercano a los 90% esto es porque los valores obtenidos comienzan desde los 12.90[V] y llega cercano al 20% que indica que es 11.6[V], se ve que la forma de la curva de SoC, es dependiente de forma directa del voltaje en bornes, esto es porque este método está basado en el modelo de Thevenin de la Batería.

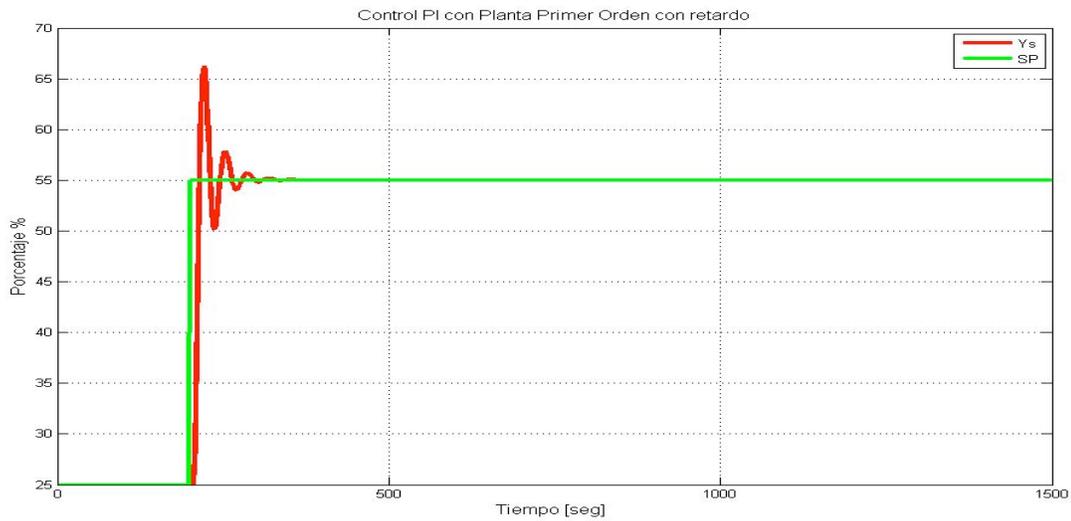
## 4.6 Simulación Controlador PI

Ya obtenidos los parámetros de la planta en la sección 3.11 se realiza la simulación de la planta con un controlador PI y utilizando el método de Lazo cerrado, se sintoniza el controlador y de esta forma se obtienen los parámetros del controlador, los cuales serán utilizados en la planta piloto microcanal.

Se simula con perturbación constante, esto genera un offset de nivel, si con el variador se tiene en un escalón de 80% con la compuerta totalmente abierta se produce un 25% de nivel, es por ello que es necesario para efectos de simulación asumir la condición inicial de 25% para el nivel.

Tabla 4.2  $K_c$  y  $T_i$  Método Lazo Cerrado

Parámetro	Valor
$K_c$	0.75%
$T_i$	23.33[seg]

Figura 4.12: Simulación Controlador PI con planta de primer orden con retardo  $K_c=0.75$  y  $T_i=23.33$ 

#### 4.7 Estimación en línea del SoC con control del microcanal

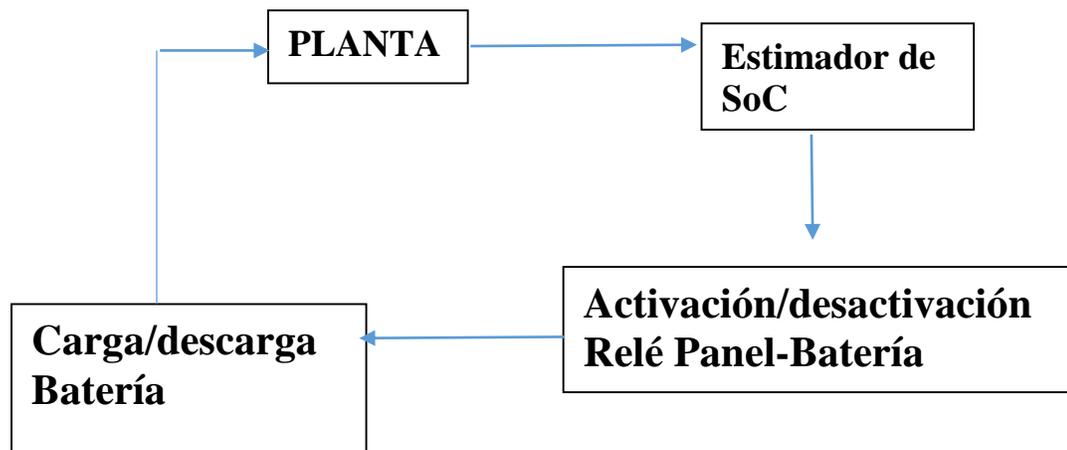


Figura 4.13: Esquema Control Consumo de energía Compuerta Microcanal

Se realizó un control PI del microcanal con la compuerta, monitoreando las corrientes tanto de carga como de descarga, el SoC, y el voltaje en bornes de las baterías como se muestra en la siguiente figura 4.14 a y b.

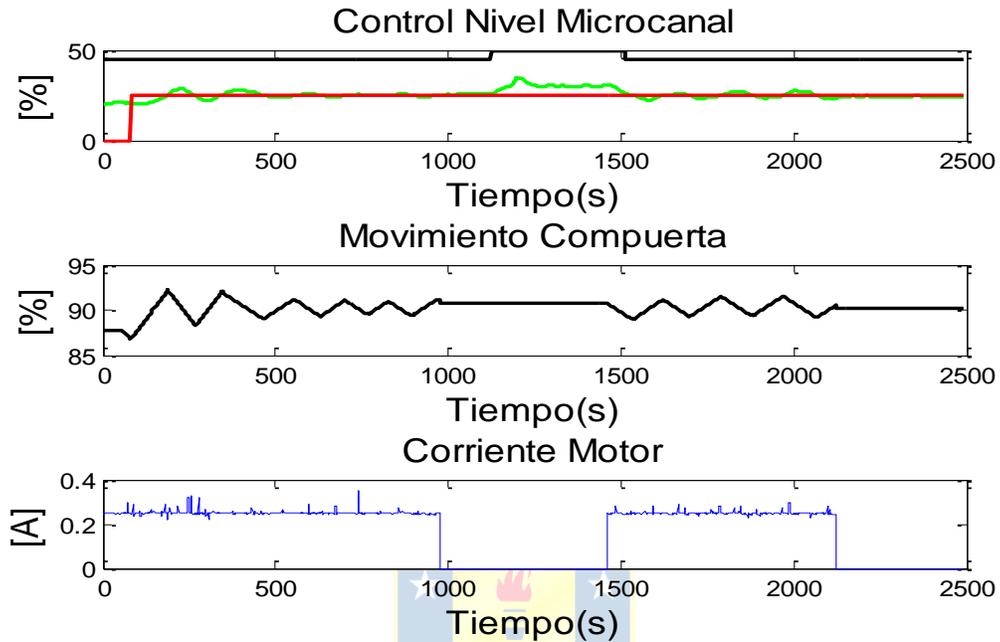


Figura 4.14.a: De arriba hacia abajo (a) Control Microcanal, (b) Movimiento Compuerta, (c) Corriente motor,

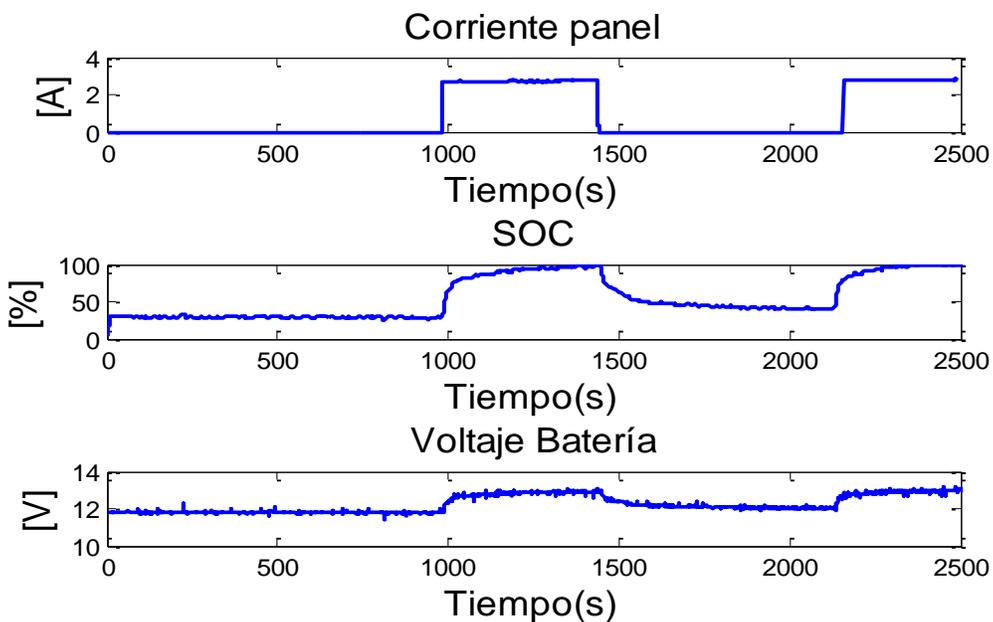


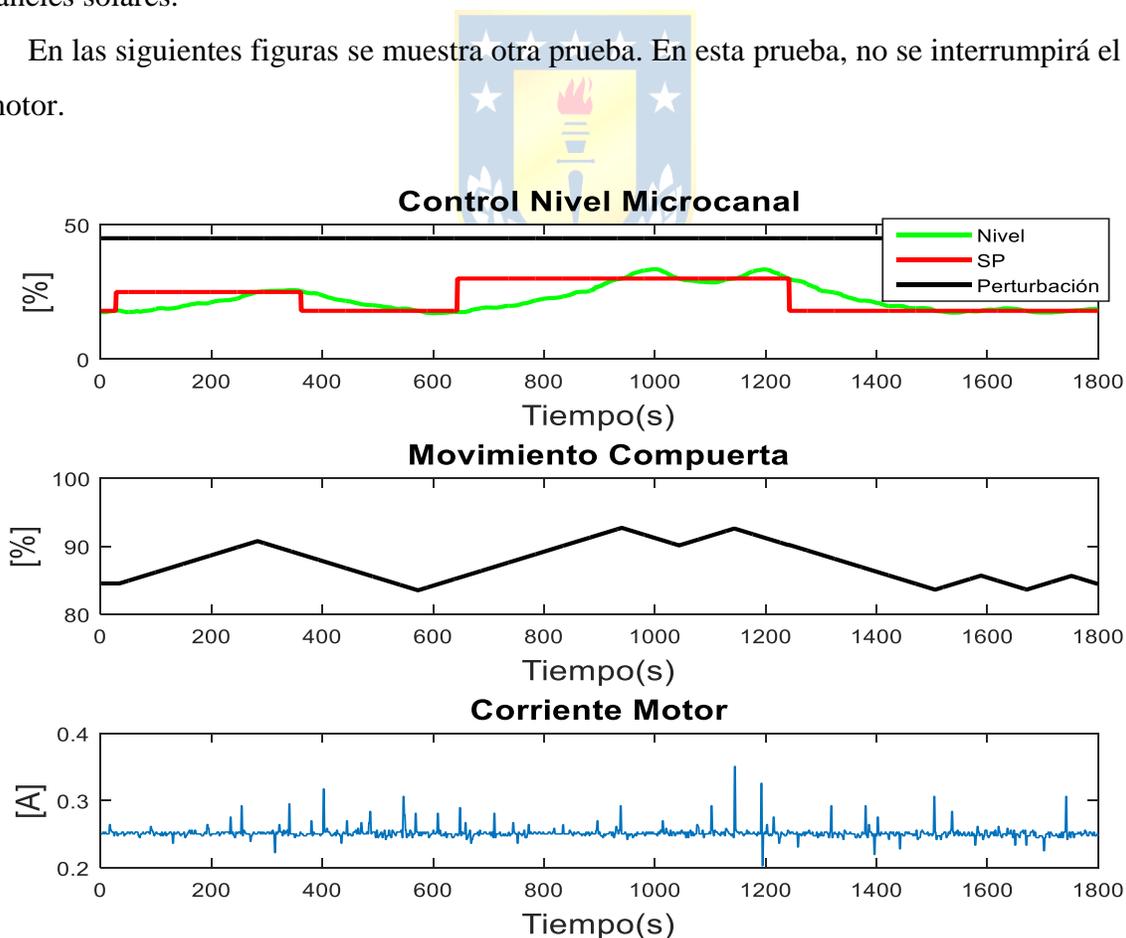
Figura 4.14.b a) Corriente panel b) SoC c) Voltaje Batería

Se hizo que el relé Panel-Baterías se activara cuando el SoC llegara a 25%, y al mismo momento se desconecta el relé baterías- motor, el relé Panel-Baterías se desactiva cuando llega al 100% de carga, y en este momento se vuelve a activar el relé baterías-motor se puede apreciar que el voltaje de la figura 4.14.b luego decae, debido a que las baterías dejaron de ser cargadas. Luego se activó cuando el SoC llegue al 38%, y se desactiva el relé baterías-motor, se nota que el SoC rápidamente llega al 100%, esto es porque la corriente de carga de los paneles es elevada en comparación con la corriente de descarga, en cambio cuando está consumiendo corriente el motor, la corriente de descarga es relativamente pequeña y el SoC tiene un descenso lento.

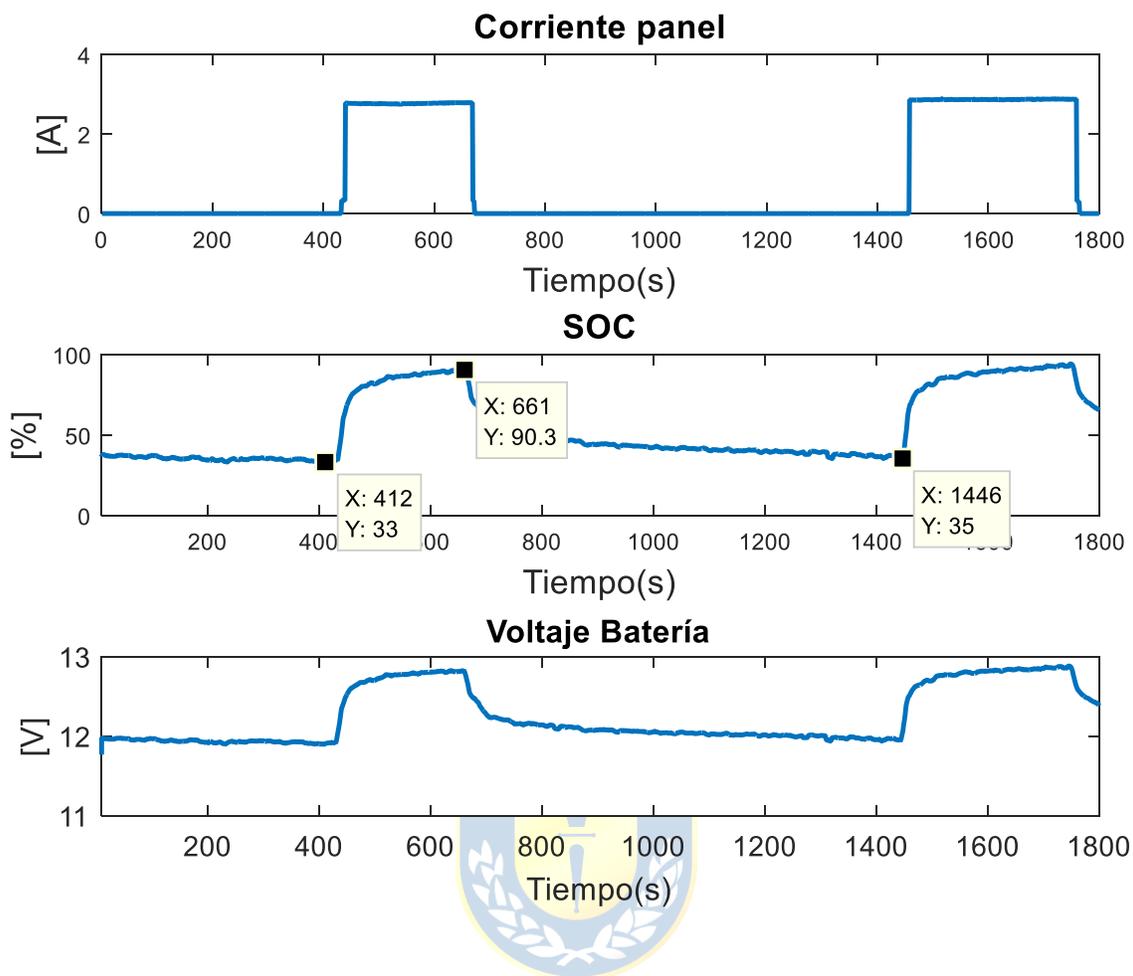
Se puede ver el compromiso de control del consumo de energía y del control del microcanal, éste último se deja de lado por unos 470[seg], donde se pierde la referencia en la figura 4.14 (a) del control del microcanal, para prevalecer la carga de las baterías alimentadoras del motor.

Es evidente la dependencia del SoC del voltaje en bornes de las baterías y de la corriente de los paneles solares.

En las siguientes figuras se muestra otra prueba. En esta prueba, no se interrumpirá el control del motor.



**Figura 4.15: a) Control Nivel Microcanal b) Movimiento Compuerta c) Corriente motor**



**Figura 4.16 a) Corriente panel b) SoC c) Voltaje Batería**

En esta prueba se determinó que cuando el SoC estuviera en los 33% se activara el relé panel-Baterías y cuando llegara a un 90% del SoC, se desactivara, luego de un tiempo se puso la condición de que en un 35% nuevamente volviera a activarse, cabe destacar que en la figura 4.16, se muestra que el motor en todo momento está realizando la acción de control, por lo que se puede mostrar que se puede realizar un control del nivel junto con un control del SoC de las baterías sin ningún problema.

Notar que el SoC tiene un descenso lento, esto es debido a que la corriente que consume el motor es relativamente baja a la capacidad que entrega las baterías.

## Capítulo 5 Conclusiones

---

### 5.1 Sumario

Con el trabajo realizado en la revisión bibliográfica en el primer y segundo capítulo de este trabajo se pudo comprender el funcionamiento de los acumuladores, junto con su modelación fenomenológica y distintos tipos de estimación de carga, también se abordó el tipo de control del microcanal.

Luego se desarrolló un sistema de adquisición de datos como se especifica en el capítulo 3, este sistema permitió comprobar que el microcontrolador Arduino es una solución factible para que funcione como tarjeta de adquisición de datos, de bajo costo y confiable.

Finalmente se realizaron una serie de experiencias prácticas con el microcanal detalladas en el capítulo 4, que permitieron ver la dinámica del comportamiento del estado de carga de las baterías. Estas experiencias fueron de suma importancia, ya que permitieron comprobar la factibilidad del estimador diseñado, de tal manera de poder tener un buen control del consumo de energía de la compuerta del microcanal.

### 5.2 Conclusiones

La hipótesis planteada al inicio del presente informe fue comprobada en su totalidad, ya que fue posible implementar el estimador de manera exitosa, comprobándose que mediante un PLC es posible controlar el estado de carga de las baterías mediante los sensores y actuadores instalados. De esta forma se pudo evidenciar que el estimador diseñado resultó ser bastante preciso para desempeñar las tareas a las que fue requerido, las cuales se centraban en cargar y descargar la batería a distintos niveles de SoC.

Así mismo se logró comprender el funcionamiento de la batería y se pudo elegir satisfactoriamente un modelo, en este caso el modelo de Thevenin resultó ser bastante exacto, el cual junto con el método de la integral de la corriente permitió dar paso a un estimador mixto, el cual une las ventajas de ambos. Los resultados obtenidos con este modelo mixto son bastante buenos, el algoritmo es relativamente sencillo y se puede implementar fácilmente.

De igual modo fue posible implementar exitosamente el sistema de adquisición de datos basado en el microcontrolador Arduino. Esta instrumentación utilizada logró funcionar correctamente con lo cual se pudieron generar los resultados experimentales y obtener los parámetros del modelo de Thevenin mediante un protocolo bien definido para determinar dichos parámetros.

El sistema de comunicación de los sensores conectados al Arduino fue transmitido al PLC mediante Simulink y con un servidor OPC, finalmente al controlador. Éste sistema funcionó correctamente y el controlador pudo obtener la medición en tiempo real, lo que permitió posteriormente estimar el SoC.

Todo lo anterior permitió desarrollar un control del microcanal con la compuerta accionada por el motor paso a paso, en el cual se monitorea en todo momento el SoC de las baterías. Con esto se programó en el PLC, la priorización del consumo de energía dejando en lazo abierto el control, y enfocándose en que las baterías obtuvieran su máxima carga.

Se puede destacar además que al alimentar un dispositivo a través de un sistema fotovoltaico con respaldo de energía y tener un control adecuado del SoC se asegura tener un funcionamiento continuo y controlado en aplicaciones como canales de regadío donde en la mayoría de los casos no se tiene acceso a la red eléctrica común. De igual modo se puede señalar que este estimador es una alternativa viable para ser implementado en un sistema fotovoltaico que englobe un sistema con más baterías y paneles solares, con la precaución de adaptar los sensores a valores aptos para realizar de manera precisa las mediciones correspondientes.

### **5.3 Trabajo Futuro**

Se propone la modelación de las baterías incluyendo el efecto de la temperatura, el modelo de Coppeti abarca este aspecto, junto con otro método de estimación ya sea lógica difusa o filtro de Kalman.

Debido a que el consumo del motor es relativamente bajo, es posible alimentar más sensores y actuadores, esto sumado a agregarle mas paneles solares.

El regulador de carga, si bien cumple los requerimientos mínimos para ocuparlo, el sistema es demasiado dependiente de éste, por ende se propone el diseño de un regulador de carga solar más preciso.

Se propone la modelación de los paneles solares, para conocer el comportamiento de estos en distintos días con distintos tipos de irradiación, lo que afectará directamente a la carga de las baterías.

Se propone el diseño de un sistema experimental de carga y descarga, esto debido a que si bien con una simple resistencia fue posible hacer las pruebas de relajación, con una carga programable, se podrían obtener mayor cantidad de muestras, y mejorar la precisión del modelo.



## Bibliografía

- [1] Dr. Leonardo Palma “*Apuntes de clases, asignatura fuentes de energía alternativa*”.. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción [1].
- [2] D. Linden y T.B Reddy “*Handbook of batteries*” Third edition, McGraw-Hill, 2002 [2]
- [3] D.G. Murillo, “*Modelamiento y análisis de sistemas fotovoltaicos*” Tesis doctoral de la universidad politécnica de Cataluña, Barcelona, España 2003
- [4] M. Sueldo “*Modelado y ensayo de Baterías: Validación de simulaciones de carga y descarga*”, Cartagena, Noviembre 2009, Ingeniería Técnica Industrial, Universidad politécnica de Cartagena.
- [5] S.Abu-Sharkh y D. Doerffel, “*Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries*”, *Journal of power Sources*, p 266-274 2004.
- [6] C.Burgos “*Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman*” Tesis para optar al grado de Magister en ciencias de la ingeniería mención eléctrica. Santiago, Universidad de Chile, 2013. [6]
- [7] A.Shafiei, A. Momeni y S. Williamson, “*Battery modeling approaches and management techniques for Plug-in Hybrid Electric Vehicles*”, *Vehicle power and propulsión Conference (VPPC)*, 2011 IEEE, pp 1-5 2011.[7]
- [8] B. Severino, “*Modelación de un sistema fotovoltaico y un banco de baterías de plomo ácido como elementos de una micro-red*”, Tesis para optar al grado de ingeniero civil electricista de la Universidad de Chile , Santiago Chile 2011
- [9] F.Codecá , S.M Savaresi y G.Rizzoni, “*On battery state of charge estimation: A new mixed algorithm*” *Control applications*, 2008. CCA 2008. IEEE International Conference on, pp 102-107,2008
- [10] C. Burgos “*Diseño del estimador de estado de carga (SoC) para el auto solar Eolian 2 para WSC*”. Trabajo para el curso EL67B, del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Chile, Santiago , Chile ,2011.[10]
- [11] S. Piller, M Perrin y A. Jossen, “*Methods for state of charge determination and their applications*”, *Journal of power sources*, pp 113-120,2001. [11]

- [12] C.- F Chiasserini y R. Rao, “Energy efficient battery management”, IEEE Journal on selected Areas in Communications, vol 19 n°7, p. 1235-1245, 2001.[12]
- [13] J. Kim y B. H Cho, “State of Charge Estimation and State-of-health Prediction of a Li-ion degraded Battery Base don an EKF Combined with a per unit System”. Vehicular Techonlogy, IEEE [13]
- [14] F. Sun, R Xiong, H. H, W. Li y J. E.E Aussems, “Model-based dynamic multiparameter method for peak power estimation of lithium-ion batteries”, Applied Energy. n°161, p 1400-1411,2006.[14]
- [15] L. Gao, S. Liu y R. A. Dougal, “Dynamic lithium-ion battery model for system simulation”. Components and packaging Technologies, IEEE Transactions on, vol. 25,pp 495-505, 2002 [15]
- [16] M. Chen y G. A. Rincon-Mora “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance” Energy Conversion ,IEEE Transactions on, vol.21, pp 504-511, 2006
- [17] H Zhang y M.-Y. Chow. “ On-line PHEV battery hysteresis effect dynamics modeling”, IECON 2010-36th annual conference on IEEE Industrial Electronics Society
- [18] Bruno Moraga Ramírez, “Modelación de Microcanal para control y estimación”, Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico, Marzo 2014, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción
- [19] Nolbert Cuevas Alarcón, “Sistema de generación eléctrica a través de paneles solares para alimentar sensor/transmisor de nivel inalámbrico”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico
- [20] Rodrigo Fernández Briones, “Montaje y Control de Compuerta accionada por Motor paso apaso en Microcanal”, Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico, Diciembre 2014, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [21] “Manual #:940-0S133, SMD23E” AMCI, 2013.

[22] “Manual de referencia Números de catálogo 1756-L1x, 1756-L5x, 1756-L6x, 1768-L4x, 1769-L30, 1769-L31, 1769-L32C, 1769-L32E, 1769-L35CR, 1769-L35E, 1789-L60, 1794-L34, 20D”, Rockwell Automation, Julio 2013

[23] J.Baichtal “Arduino for Beginners Essential skills every maker needs” Que Indiana USA 2014.



## Anexo a.1 Controlador Discreto RsLogix

```

SBR(SP);
// PV
PV:=Local:5:l.Ch3Data; //Medidor de Nivel Endres & Hausser Hart
//Parametros Controlador
Kc:=0.577; //Ganancia Proporcional
Ti:=74.33; //Tiempo Integrativo
Td:=0; //Tiempo Derivativo
T0:=0.4; //Tiempo de Muestreo
//Limitante
dukmax:=20; //Limitador de Cambio
BM:=0; //Banda de Ruido
// Calculo Controlador
ek:=SP-PV; // Error Directo
if abs(ek)< BM then ek:=0; end_if; // Calculo de error Banda Muerta
q0:=Kc*(1+(T0/Ti)+(Td/T0));
q1:=-Kc*(1-(T0/(2*Ti))+2*(Td/T0));
q2:=Kc*(Td/T0);
duk:=q0*ek+q1*ek1+q2*ek2;
// Limitador de cambio.
if duk>0 then sign:=-1; end_if;
if duk=0 then sign:=0; end_if;
if duk<0 then sign:=1; end_if;
// Limitador dUmax
if abs(duk)>dukmax then duk:=dukmax; end_if;
//Controlador
uk_M := uk1_M + sign*abs(duk);
if uk_M>100 then uk_M:= 100; end_if;
72
if uk_M<0 then uk_M:=0 ; end_if;
//Actuador
position_user_porcent:=uk_M;
// Se guarda los valores actuales.
ek2:=ek1;
ek1:=ek;
uk1_M:=uk_M;
RET(position_user_porcent);

```



## Anexo A.2 Algoritmo Control Compuerta accionada por Motor paso a paso

```

// Declaración Variables
Apertura:=100-position_user_porcent;
// Limites Compuerta SMD23E
if buffered_SMD23E_data[2]<=MIN_position then run_SMD23E:=0; end_if;
if buffered_SMD23E_data[2]>=MAX_position then run_SMD23E:=0;end_if;
// Conversión de Porcentaje de Apertura a Vueltas del Encoder
position_user:=MIN_position +(( position_user_porcent*(MAX_position-
MIN_position))/100);

```

```

Position_actual:=((buffered_SMD23E_data[2]-MIN_position)*100)/(MAX_position-
MIN_position);
//Variable auxiliar para detectar cambios de sentido
control:=run_SMD23E;
//Reglas de Operación SMD23E
if abs (buffered_SMD23E_data[2]-position_user)<2 then //Precisión del Programa
run_SMD23E:=0;
else
if buffered_SMD23E_data[2]<position_user then // Sentido de Giro Antihorario
(Deslizamiento hacia Abajo)
if control<>2 then
run_SMD23E:=2; end_if;
end_if;
if buffered_SMD23E_data[2]>position_user then //Sentido de Giro Horario
(Deslizamiento hacia Arriba)
if control<>3 then
run_SMD23E:=3;
AMCI_SMD23E:O.Data[4]:=1;
end_if;
end_if;
if buffered_SMD23E_data[2]>position_user then // Detecci n Cambio de
Sentido de giro
if control=2 then
run_SMD23E:=0;
end_if;
end_if;
if buffered_SMD23E_data[2]<position_user then // Detecci n Cambio de
Sentido de giro
if control=3 then
run_SMD23E:=0;
end_if;
end_if;
66
if abs (buffered_SMD23E_data[2]-position_user)<10 then // Velocidad de giro
para trayectos Cortos(Menores a 10mm)
AMCI_SMD23E:O.Data[4]:=1;
end_if;
if abs (buffered_SMD23E_data[2]-position_user)>=10 then // Velocidad de
giro para trayectos Largos(Mayores a 10mm)
AMCI_SMD23E:O.Data[4]:=3;
end_if;
end_if;

```



## Anexo B.1 Especificaciones técnicas Paneles solares

Electrical characteristics	
Typical power (Watts) at STC*	20
Nominal rated voltage at STC*	12V
Maximum power (Watts)	20
Tolerance (%)	+/- 3%
Voltage at max power	>16,0
Current at max power	1,22
Open circuit voltage	20
Short circuit current	1.5
Cells	
Size	¼ 5'
Layout	36 cells / 9x4
Type	Monocrystalline
General information	
Diodes	No
Type of connection	Junction box / faston cable bracket
Weight (kg)	2.45

## Anexo B.2 Datasheet Baterías utilizada



### Battery Construction

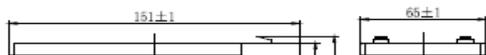
Component	Positive plate	Negative plate	Container	Cover	Safety valve	Terminal	Separator	Electrolyte
Raw material	Lead dioxide	Lead	ABS	ABS	Rubber	Copper	Fiberglass	Sulfuric acid

### General Features

- Absorbent Glass Mat (AGM) technology for efficient gas recombination of up to 99% and freedom from electrolyte maintenance or water adding.
- Not restricted for air transport-complies with IATA/ICAO Special Provision A67.
- UL-recognized component.
- Can be mounted in any orientation.
- Computer designed lead, calcium tin alloy grid for high power density.
- Long service life, float or cyclic applications.
- Maintenance-free operation.
- Low self discharge.

### Dimensions and Weight

Length(mm / inch)	151 / 5.94
Width(mm / inch)	65 / 2.56
Height(mm / inch)	93.5 / 3.68
Total Height(mm / inch)	100 / 3.94
Approx. Weight(Kg / lbs)	2.32 / 5.12



### Performance Characteristics

Nominal Voltage	12V
Number of cell	6
Design Life	5 years
Nominal Capacity 77°F(25°C)	
20 hour rate (0.35A, 10.5V)	7Ah
10 hour rate (0.68A, 10.5V)	6.8Ah
5 hour rate (1.13A, 10.5V)	5.65Ah
1 hour rate (4.56A, 9.6V)	4.56Ah
Internal Resistance	
Fully Charged battery 77°F(25°C)	28mOhms
Self-Discharge	
3% of capacity declined per month at 20°C(average)	
Operating Temperature Range	
Discharge	-20~60°C
Charge	-10~60°C
Storage	-20~60°C
Max. Discharge Current 77°F(25°C)	105A(5s)
Short Circuit Current	350A
Charge Methods: Constant Voltage Charge 77°F(25°C)	
Cycle use	14.5-14.9V
Maximum charging current	2.8A
Temperature compensation	-30mV/°C
Standby use	13.6-13.8V
Temperature compensation	-20mV/°C

## Anexo C Simulink utilizado para la estimación

