

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO DE
MEDICIÓN QUE ESTIME LA CAPACIDAD ELÉCTRICA QUE
PUEDEN PROVEER LAS BATERÍAS LI-ION Y PILAS
ALCALINAS**

Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Jeancarlo Jesús Colonio Cossio

ASESOR: Ing. Hugo Carlos Eduardo Pratt Linares

Lima, Mayo del 2016

Índice general

INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMÁTICA Y ESTADO DEL ARTE DE LOS INSTRUMENTOS PARA BATERÍAS	2
1.1. Problemática sobre la capacidad eléctrica de las baterías	2
1.2. Parámetros de las baterías	3
1.3. Tipos de batería	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivos Específicos	7
2. MARCO TEORICO	9
2.1. Métodos para estimar la capacidad eléctrica de las baterías	9
2.2. Instrumentos actuales de medición para baterías	13
2.3. Estructura de los instrumentos de medición para baterías	15
2.4. Topologías del sistema de control del método de descarga	18
2.5. Evaluación de la incertidumbre	22
2.5.1. Evaluación tipo A de la incertidumbre típica	24
2.5.2. Evaluación tipo B de la incertidumbre típica	24
2.6. Estándares para descarga de baterías	25

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	26
3.1. Objetivo del diseño	26
3.2. Diagrama de bloques	26
3.3. Requerimientos para el diseño	28
3.3.1. Sistema de Control y Descarga de Corriente Constante	29
3.3.2. Control Digital y Adquisición de Voltaje y Corriente	29
3.3.3. Sensor de Temperatura e Interfaz de Usuario	29
3.3.4. Procesador y Reloj de Tiempo Real	29
3.3.5. Diagrama de Flujo	29
3.3.6. Implementación	29
Bibliografía	30

INTRODUCCIÓN

La batería ha sido un dispositivo sustancial a lo largo de la historia al momento de proveer energía a diferentes aplicaciones tales como vehículos aéreos no tripulados, vehículos eléctricos, teléfonos móviles, ordenadores portátiles, entre otros. Y debido a que la tecnología avanza, el desarrollo de las baterías ha tenido que mejorar para cumplir los requerimientos de portabilidad, eficiencia de energía y miniaturización [1].

En la actualidad las baterías secundarias, más conocidas como baterías recargables, son las más populares al momento de elegir una fuente de energía. Así mismo las baterías primarias, aquellas baterías o pilas que no son recargables, están siendo desplazadas por las baterías recargables; sin embargo, se debe resaltar que son bastantes prácticas para ciertas aplicaciones específicas [2].

A pesar de que el desarrollo de las baterías ha ido mejorando en los últimos años, en la actualidad las empresas que fabrican las baterías no proveen información detallada sobre la capacidad eléctrica que contienen éstas después de su primer uso. Incluso algunas empresas como Energizer y Duracell han dejado de brindar información sobre la cantidad de mAh de las pilas alcalinas, lo que se vuelve un problema para los usuarios al momento de querer utilizar las baterías o pilas para un proyecto de laboratorio que requiera una corriente específica.

En esta tesis se planteará el diseño de un instrumento de medición que tendrá como principal objetivo estimar la capacidad eléctrica que pueden proveer los bancos de baterías basados en baterías tipo li-ion, como las que se emplean en teléfonos móviles y las pilas alcalinas.

Capítulo 1

PROBLEMÁTICA Y ESTADO DEL ARTE DE LOS INSTRUMENTOS PARA BATERÍAS

1.1. Problemática sobre la capacidad eléctrica de las baterías

En general, las baterías han sido muy útiles en distintos proyectos de electricidad, electrónica, robótica, entre otros. Sin embargo, la selección adecuada de una batería para cierta carga específica ha sido un problema que ha llevado a muchos usuarios, entre ellos estudiantes de pregrado, presentar consultas sobre la capacidad eléctrica de las baterías. Por ejemplo, en un foro reconocido [element14](#), un estudiante de ingeniería eléctrica desea controlar un motor, pero no está seguro de cuánto durarían sus pilas alcalinas o si sería mejor usar una batería Li-ion [3]. Otro ejemplo, en un foro británico reconocido, un usuario que empieza a utilizar el Raspberry Pi desea saber cuánto duraría su microcontrolador con una batería Li-ion [4]. El problema de la falta de información sobre las baterías requiere mayor atención en los laboratorios donde se realizan proyectos electrónicos. Por lo tanto, urge la necesidad de realizar una estimación de la capacidad que puedan brindar las baterías.

Dada la gran variedad de tipos de batería en el mercado, resulta difícil obtener una estimación de la capacidad eléctrica de una batería a partir de un solo método. Incluso baterías del mismo modelo y fábrica no muestran resultados precisos usando el mismo método [2]. Por ello es necesario revisar los parámetros que están relacionados con la capacidad eléctrica de las baterías como, por ejemplo: impedancia interna, profundidad

de descarga, temperatura, entre otros. Así mismo, se busca dar un mejor enfoque al asunto de estudio reduciendo los tipos de batería que se van a tratar en la presente tesis.

1.2. Parámetros de las baterías

Los parámetros de las baterías son aquellas variables que se utilizan para describir ciertas características que tienen en común la mayoría de baterías. Según una guía proporcionada por el equipo de vehículos eléctricos del MIT, los parámetros son divididos en dos secciones: Especificaciones técnicas de la batería y Estado de la batería. La primera sección hace referencia a las variables que se suelen encontrar en las hojas de datos de las baterías, por ejemplo: voltaje nominal, voltaje de corte, capacidad nominal, energía nominal, ciclo de vida, energía específica, entre otros. Mientras que la segunda sección hace referencia a las variables que describen la condición actual de la batería como, por ejemplo: estado de carga, profundidad de descarga, impedancia interna, entre otros [5]. A continuación, se describe en mayor detalle los parámetros que están relacionados con la capacidad eléctrica de las baterías:

Especificaciones Técnicas

- Profundidad de Descarga: La profundidad de descarga, también conocido como Depth of Discharge (DoD), se refiere al porcentaje de la capacidad máxima de la batería que ha sido descargado [5]. Así mismo, el DoD es un indicador que está estrechamente relacionado con el ciclo de descarga y el voltaje de fin de descarga. Este último indica el voltaje límite de la batería donde ya no se pueda descargar más, ya que se utiliza como medio de protección para evitar sobre descargas que dañen la batería. Así mismo, cabe resaltar que el voltaje de fin de descarga es afectado si es que la batería es descargada a corrientes altas o la temperatura es considerablemente alta o baja.

En la tabla 1.1 se puede apreciar los diferentes niveles de voltaje que se encuentra las baterías una vez descargadas, estos datos sirven como referencia para los instrumentos de medición.

Cuadro 1.1: Voltajes de fin de Descarga para distintos tipos de batería y a diferentes cargas [2].

End-of-discharge	Li-manganese	Li-phosphate	Lead Acid	NiCd/NiMH
Normal load	3.00 V/cell	2.70 V/cell	1.75 V/cell	1.00 V/cell
Heavy load	2.70 V/cell	2.45 V/cell	1.40 V/cell	0.90 V/cell

- Ciclo de Descarga: El ciclo de descarga se debería entender que es el ciclo de carga y descarga total de la batería; sin embargo, los fabricantes de baterías, por lo general, tienden a establecer que solo se utilice un 80 % de profundidad de descarga y el otro 20 % queda como reserva. La razón por la que los fabricantes establecen esta medida es debido a que una descarga incompleta incrementa el tiempo de vida de la batería. No existen estándares fijos que constituyan un ciclo de descarga, no obstante, las baterías inteligentes consideran que un ciclo de descarga no debería ser menor a 70 %. Además, en términos de ciclo de carga y descarga, la capacidad eléctrica de las baterías se ve afectada, ya que reduce su desempeño considerando el tipo de descarga que se haya realizado [2].

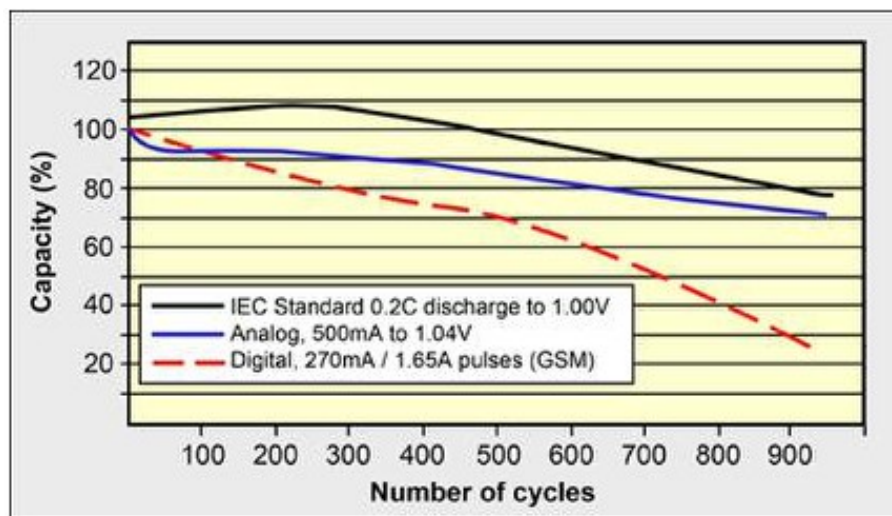


Figura 1.1: Ciclo de vida de una batería Níquel Metal Hidruro(Ni-MH) bajo diferentes tipo de descarga [2].

En la figura 1.1 se puede observar que las descargas por pulsos afectan demasiado a la capacidad eléctrica de las baterías, generalmente este tipo de descarga se encuentra en los celulares. Por otro lado, se percibe que las descargas a ratio C estandarizado por IEC y las descargas analógicas no afectan en gran magnitud a

los ciclos de carga y descarga de la batería. Por último, resaltar que las pruebas de la ilustración 1 son de una batería Níquel Metal Hidruro(Ni-MH), sin embargo, el autor señala que el comportamiento es similar para las baterías Li-ion [2].

- Capacidad nominal: La capacidad nominal de una batería es la cantidad de energía que puede proveer a los sistemas y es medido en mili Ampere-hora (mAh). Esta medida indica la cantidad de tiempo que puede durar una batería siendo descargada a una cantidad de corriente. Por ejemplo, una batería que indica una capacidad nominal de 2000mAh es capaz de cargarse o descargarse en una hora a una corriente de 1 Amperio. Sin embargo, cabe resaltar que en la práctica esto no sucede ya que hay otros factores como temperatura, impedancia interna, nivel de corriente, tipo de batería y entre otros que afectan la capacidad nominal [2], [5].

Estado de la batería

- Estado de la carga:El estado de carga, también llamado State of Charge (SoC), es un parámetro de la batería que se expresa en porcentaje e indica la capacidad eléctrica que puede proveer una batería sobre su capacidad nominal. El SoC, por lo general, es calculado usando una integración de cargas aplicada como corriente para determinar el cambio de la capacidad eléctrica de la batería en el tiempo [5]. Así mismo, el parámetro SoC es exactamente lo contrario al DoD, por lo que es válido afirmar sobre un SoC mínimo del 20 % para evitar daños a la batería [6].

$$SoC_{min} = 100\% - DoD_{max}$$

Los métodos más utilizados para determinar el SoC son tres: Medición de la densidad específica, Medición basada en la tensión, Coulomb Counting y la combinación de técnicas recién mencionadas. Sin embargo, como el objetivo de la tesis no es estimar la capacidad eléctrica de la batería durante su tiempo de vida estimada, no se entrará en detalle de estas técnicas.

- Impedancia Interna: La impedancia interna es la resistencia que oponen todos los componentes internos de la batería como electrodos electrolito y terminales [6]. Además, la resistencia interna varía en función del estado de carga, estado de salud y el tipo de batería que se está analizando. A medida que la resistencia interna

sube, la eficiencia de la batería disminuye y la estabilidad térmica se reduce de manera proporcional a la carga de energía que se convierte en calor [5]. Según Isidor Buchmann, usualmente se utiliza como referencia la impedancia interna para cambiar las baterías, ya que si ésta es muy alta significa que la batería esta por caducar. Sin embargo, este método es especialmente útil para baterías estacionarias como las baterías plomo ácido [2].

Temperatura

Las descargas varían el desempeño de las baterías según su tipo, además de eso las descargas también afectan a las baterías si son realizadas a diferentes temperaturas. En el libro *Batteries in a Portable World*, el autor afirma que las baterías, que operan a altas temperaturas, aumentan su desempeño mediante la reducción de su impedancia interna y acelerando los metabolismos químicos; sin embargo, esto reduce su tiempo de vida. En adición, el autor sostiene que cuando las baterías operan a bajas temperaturas, se incrementa su impedancia interna y disminuye su capacidad eléctrica. Si una batería podía entregar el 100 % de su capacidad a una temperatura de 27°C, se estimaría que entregaría solo el 50 % a -18°C [2].

1.3. Tipos de batería

Luego de revisar los diferentes parámetros de las baterías, se observó que éstos difieren mucho entre los distintos tipos de batería. Por lo tanto, para el objetivo de la tesis se reducirá el campo de estudio del instrumento a las baterías que se vendan más en el mercado o los más utilizados en los proyectos manejados en los laboratorios.

Según un estudio realizado el 2009 por Frost Sullivan, habían pronosticado que las baterías primarias (no recargables) iban a decaer en un 7.4 % en el mercado con proyección al 2015, ya que las baterías secundarias (recargables) las estaban desplazando. Así mismo, en la figura 1.2, se observa que hay 3 tipos de baterías predominantes en el mercado: las baterías li-ion, las baterías de arranque y las baterías alcalinas. Las baterías li-ion y alcalinas son muy comunes en los proyectos utilizados por los estudiantes, profesores o investigadores debido a su peso liviano y duración apropiada. Sin embargo, las

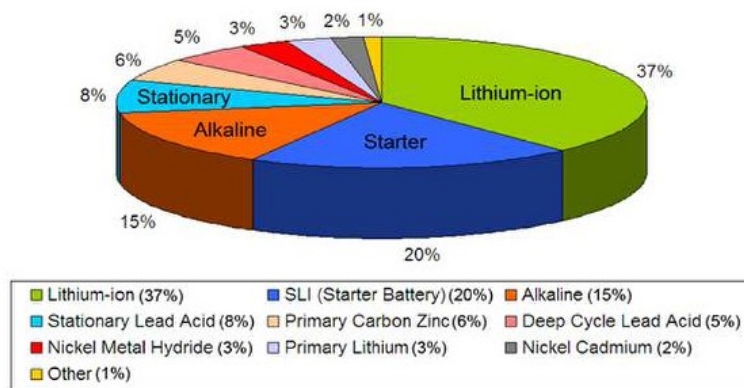


Figura 1.2: Frost Sullivan (2009) - Contribuciones de ingresos clasificados por tipo de batería [2].

baterías de arranque son baterías utilizadas en los automóviles o sistemas pesados en la industria. Por lo tanto, a partir de este punto, el campo de estudio de la tesis abarcará a las baterías li-ion y baterías alcalinas, también llamadas pilas alcalinas en el mercado local.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y desarrollar un instrumento que permita estimar la capacidad eléctrica que proveen los bancos de baterías basados en baterías tipo li-ion, como las que se emplean en para teléfonos móviles, y pilas alcalinas.

1.4.2. Objetivos Específicos

Para el desarrollo de este trabajo de tesis se tuvo que cumplir con los siguientes objetivos:

- (a) Estudio previo sobre conceptos de medición y métodos para la estimación de la capacidad eléctrica de las baterías.
- (b) Diseño e implementación de un prototipo del instrumento de medición.

- (c) Desarrollo del software para el control de descarga de corriente constante.
- (d) Programación de la interfaz con el usuario.
- (e) Realizar pruebas del prototipo para mostrar las curvas de descarga de la batería.

Capítulo 2

MARCO TEORICO

2.1. Métodos para estimar la capacidad eléctrica de las baterías

Tradicionalmente, los ciclos de carga y descarga han constituido un método clásico de medición de la capacidad eléctrica de las baterías. Adicionalmente, se han intentado utilizar métodos alternativos, pero sin resultados fidedignos para los usuarios. Estas incertidumbres han llevado a los usuarios a quedarse con los métodos de descarga tradicionales, a pesar de su desventaja principal, la cual es remover la batería del sistema para poder estimar su capacidad eléctrica [2]. A continuación, se mencionarán dos métodos para estimar la capacidad eléctrica de las baterías. Cabe resaltar que existen diversos métodos para analizar las baterías, sin embargo, solo se van a mencionar aquellos que involucren la estimación de la capacidad eléctrica de las baterías y no en la estimación del tiempo de vida, estado de carga, estado de salud, ni otros parámetros que caracterizan a las baterías.

Método de descarga

Se suele pensar que el método de descarga es el método más preciso para estimar la capacidad eléctrica de las baterías, sin embargo, esto no siempre ocurre, especialmente con las baterías de plomo ácido. Este método sufre variaciones en los resultados, incluso con pruebas idénticas de equipos de alta precisión que fueron utilizados en ambientes de temperatura controlados y siguiendo los estándares de descarga establecidos. Así mismo, esto se refleja en dos pruebas idénticas que se realizó a varias baterías de arranque cuyos resultados se pueden observar en la figura 2.1. El eje horizontal indica, de izquierda a derecha, las baterías más débiles hasta las más potentes y el eje vertical muestra la

capacidad eléctrica que las baterías presentaron. Las dos pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones, pero la segunda se realizó pocos días después de haber finalizado la primera. Los resultados muestran que la capacidad eléctrica del mismo tipo de batería tuvo variaciones en algunos puntos [7].

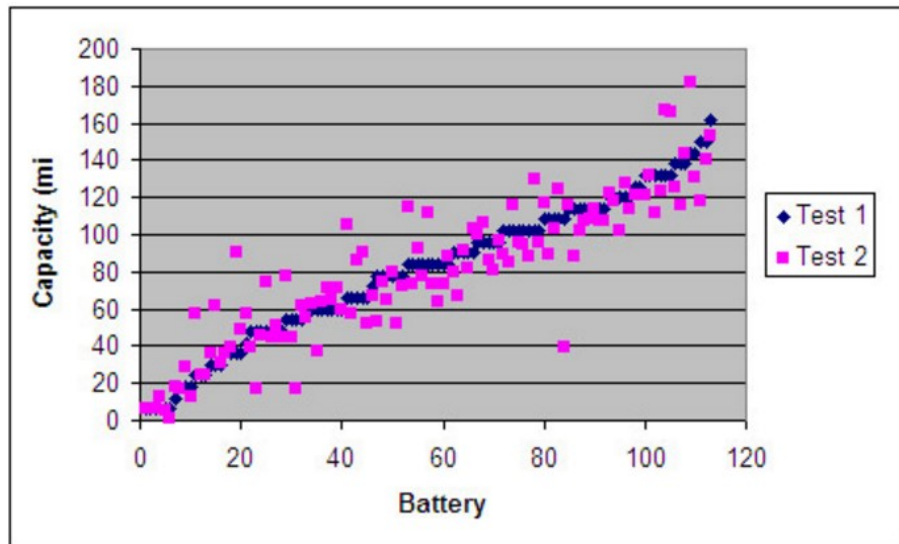


Figura 2.1: Fluctuaciones de la capacidad eléctrica como resultado de dos idénticas pruebas de acuerdo a los estándares SAE J535 [2].

Sin embargo, la mayoría de estos resultados y comentarios son aplicados para las baterías en general, pero dentro de esta incertidumbre los que muestran resultados más consistentes son las baterías tipo li-ion. Esto se debe a que los ciclos de carga y descarga afectan a la capacidad eléctrica, en mayor medida, a los tipos de batería ácido plomo; mientras que, las baterías Li-ion pueden tener entre 300 y 500 ciclos de carga y descarga sin afectar mucho a su capacidad eléctrica [8]. Así mismo, teniendo en cuenta la ilustración 1, el desempeño de la batería Ni-MH, el cual presenta similitudes en el comportamiento de las baterías Li-ion, se observa que, para descargas analógicas y descargas estandarizadas por el IEC, la capacidad eléctrica de la batería no varía mucho en los primeros ciclos de carga y descarga [2].

El funcionamiento del método de descarga se basa en aplicar una descarga a la batería con la finalidad de medir su tiempo de operación. Los instrumentos actuales en el mercado manejan cuatro tipos de descarga:

1. Descarga a Corriente Constante
2. Descarga a Voltaje Constante
3. Descarga a Potencia Constante
4. Descarga a Resistencia Constante

Los cuatro métodos coinciden en mantener una variable constante de tal manera que la descarga de la batería tenga un parámetro constante durante todo su tiempo de operación. Luego de conocer el tiempo que duró la batería, se utiliza el parámetro constante para hallar la capacidad eléctrica de la batería en mAh.

Método no Invasivo

El método no Invasivo utiliza múltiples modelos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés) con la finalidad de estimar el estado de la carga (SoC), la capacidad eléctrica y la corriente de arranque en frío, más conocido como Cold Cranking Amp (CCA). El CCA indica la capacidad de poder conducir altas corrientes en las baterías de arranque. El funcionamiento de este método se basa en introducir varias señales sinusoidales con poca amplitud a diferentes frecuencias, para luego utilizar un filtrado digital y de las señales extraídas se forma una curva de Nyquist. Luego, encima de la curva de Nyquist formada, se superpone varios modelos electroquímicos con la finalidad de correlacionar la información y obtener los parámetros clave que indicarán la estimación de la capacidad eléctrica, CCA y SoC [7].

Luego de comprender ambos métodos para la estimación de la capacidad eléctrica de las baterías, se evalúan las ventajas y desventajas de éstas. En el cuadro 2.1, se puede apreciar que utilizar el método no invasivo implica realizar subprocesos complejos que incrementarían los costos del instrumento a diseñar. Por ello, para la presente tesis, se procede a utilizar el método de descarga cuyos resultados son consistentes en el tipo de batería Li-ion.

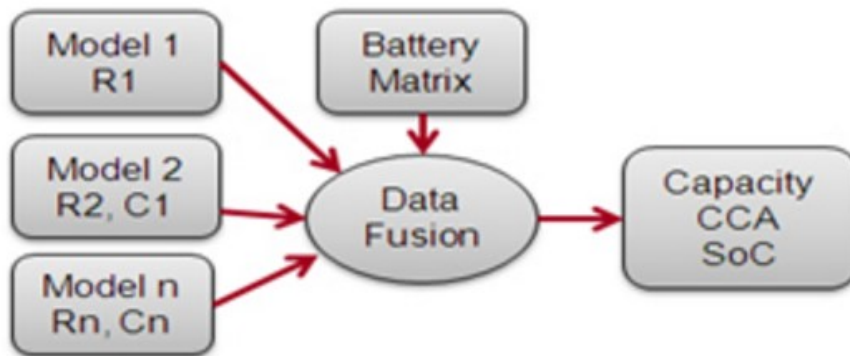


Figura 2.2: Método no Invasivo que implica la combinación de EIS con modelos complejos para estimar la capacidad de la batería [7]

Cuadro 2.1: Comparación de ventajas y desventajas entre el método de descarga y el método no invasivo [7]

	Ventajas	Desventajas
Método de Descarga	<ul style="list-style-type: none"> • Es un método práctico para hallar la capacidad eléctrica de la batería • Los resultados son consistentes en baterías Li-ion 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe trasladar la batería al instrumento para realizar el análisis • El proceso toma un tiempo considerable
Método no Invasivo	<ul style="list-style-type: none"> • El proceso de análisis se puede realizar en segundos • Es un método muy complejo de implementar 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un método que permite estimar otros parámetros de la batería • Requiere mayores costos para realizarlo

2.2. Instrumentos actuales de medición para baterías

En la actualidad, diferentes empresas de todo el mundo utilizan instrumentos de medición para medir la capacidad eléctrica de las baterías. Por ejemplo, entre las empresas más destacadas se encuentran Cadex, Mayuno Electronic, Tektronix y National Instruments. Si bien los instrumentos de medición de estas empresas difieren en características técnicas, todos ellos comparten en común el método de descarga como una alternativa para determinar la capacidad eléctrica de las baterías.

Dado que el objetivo de la tesis implica el diseño de un instrumento de medición para baterías, se resalta las características principales de éstos que servirán como referencia para el diseño propio. Entre las características principales se encuentra:

- Rango de operación de la batería: El rango de voltajes de la batería en el que opera el instrumento
- Rango de de descarga de corriente: La máxima y mínima corriente que el instrumento puede descargar
- Resolución de medida: La resolución de un instrumento es el menor incremento de la variable medida, la cual es determinado por el ADC y DAC
- Exactitud: La exactitud es aquella característica que define el rango de valores de incertidumbre al momento de hacer una lectura

Luego de haber revisado los detalles más importantes que tienen los instrumentos de medición, se realizó el cuadro 2.2 con la finalidad de poder comparar los valores de las características antes mencionadas. Así mismo, se incluye los periféricos de entrada y salida que muestran la información de la capacidad eléctrica una vez realizado todo el proceso (display y data ports).

FS: Full Scale

FR: For Reading

VFD: Vacuum Fluorescent display

Cuadro 2.2: Comparación de características entre los instrumentos actuales para baterías en el mercado

	Cadex C7600 [9]	Cadex C8000 [10]	NI PXI-4130 [11]	Tektronix 2380 [12]	Maynuo M9712C [13]
Battery voltage range	1.2 V – 36 V	1.2 V – 36 V	0 V – 20 V	0 V – 500 V	0.1 V – 150 V
Discharge method	Constant current	Constant current Constant power	Constant current Constant voltage	Constant current Constant voltage Constant resistance Constant power	Constant current Constant voltage Constant resistance Constant power
Range of discharge current	0.1 A – 6 A	0.03 A – 10 A	2 mA – 20 mA	0 A – 15 A	0 A – 6 A
Resolution	25 mA	1 mA	100 nA	1 mA	0.01 mA
Exactitud	0.25 % FS	0.25 % FS	0.03 % FS	(0.05 % FR + 0.05 % FS)	0.015 % FR + 0.05 % FS
Operating Temperature	5 °C – 35 °C	5 °C – 35 °C	0 °C – 55 °C	0 °C – 40 °C	0 °C – 40 °C
Display	2x40-character LCD	5.7" (145mm) QVGA 320x240 graphics with backlight	There isn't available information	Monitor Output BNC	High-luminance VFD screen with two line
Data ports	RS-232 or USB interfaces to PC	Ethernet 10/100 MB for connection to PC	There isn't available information	USB, RS-232, GPIB	USB, RS232, RS485

En cuanto a la resolución y exactitud de los instrumentos del cuadro 2.2, se puede apreciar que a medida que haya mayor rango de descarga de corriente, la resolución va disminuyendo. Por ejemplo, en el instrumento de National Instruments PXI-4130 se observa que tiene una resolución increíble de 100 nA, sin embargo, su rango de descarga es mucho menor que los demás instrumentos de medición. Otro ejemplo es la comparación entre los instrumentos Tektronix 2380 y Maynuo M9712C; ya que, el instrumento de Tektronix brinda un mayor rango de descarga de corriente, pero con menor resolución. Este tipo de comparación no aplica entre los instrumentos Cadex C7600 y C8000 debido a que éste último es una versión mejorada del instrumento en general. Además, en cuanto a la exactitud, se puede observar que los instrumentos manejan sistemas de adquisición avanzados para conseguir un pequeño error en las medidas realizadas. Éste último podría justificar sus elevados costos en el mercado, además de que varios de estos instrumentos ofrecen otras funciones aparte del método de descarga.

2.3. Estructura de los instrumentos de medición para baterías

Una vez identificado las características principales de los instrumentos de medición para baterías, se busca comprender las diferentes estructuras de estos instrumentos con la finalidad de tenerlos como referencia para el diseño del prototipo que propone la tesis. Para ello se revisaron las patentes del instrumento de la compañía Cadex y algunos diagramas de bloques generales que se basaron en sistemas de estimación de la capacidad eléctrica de las baterías.

En la figura 2.3 se muestra un diagrama de bloques de la patente de un instrumento de medición de la compañía Cadex. El sistema representado por este diagrama de bloques funciona a través de ciclos de carga y descarga de la batería, cuyos datos son adquiridos, procesados y guardados por un controlador. En adición, presenta un periférico de salida en el bloque 212 y los datos son almacenados en una base de datos representado por el bloque 203. En la patente no se desarrollan los bloques debido a que le dan mayor énfasis al método de lógica difusa para estimar el estado de la batería. Sin embargo, se resalta que este sistema tiene una etapa de adquisición, proceso y almacenamiento [14].

Por otro lado, se analiza dos publicaciones de la IEEE basados en sistemas de estimación de los parámetros de las baterías.

En la primera publicación, el sistema busca una estimación del estado de salud y el tiempo de vida de las baterías. El diagrama de bloques de esta publicación, como se muestra en la figura 2.4, consiste en descargar la batería y tomar los datos que serán procesados por una computadora. Se identifica tres etapas en el diagrama de bloques, las cuales son: etapa de control, etapa de adquisición y monitoreo de temperatura. La etapa de control representada por el bloque 1 sirve para mantener controlado la descarga de la batería; así mismo, la etapa de adquisición representado por el bloque 2 consiste en adquirir los valores de corriente durante todo el tiempo de operación de la batería; por último, la etapa de monitoreo representada por el bloque 3 consiste en medir la temperatura durante todo el proceso con la finalidad de tenerlo de referencia en los

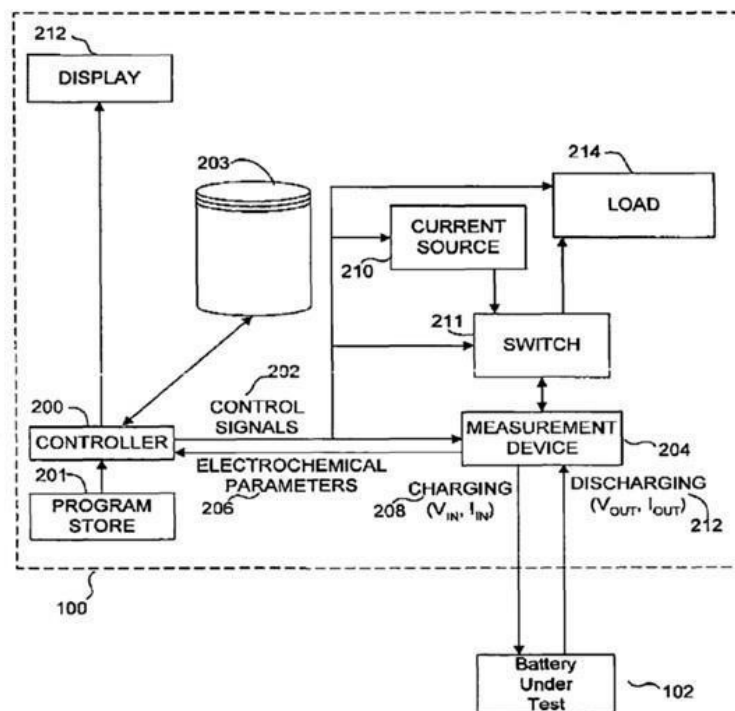


Figura 2.3: Diagrama de bloques de una patente del instrumento de medición para baterías de la compañía Cadex [14].

resultados [15].

La segunda publicación consiste en la estimación de la impedancia interna mediante el método de doble descarga en baterías ácido plomo. En la figura 2.5 se puede apreciar el diagrama de bloques que está constituido por un controlador C8051F, una PC, el método de descarga a corriente constante y un seleccionador de celdas. La PC representaría la etapa de proceso de datos; mientras que, el controlador C8051F representaría la etapa de adquisición y de control de celdas de la batería; por último, la etapa de descarga mediante el método de descarga de corriente constante por el cual se obtendrán los datos para estimar la capacidad eléctrica de la batería [16].

Luego de haber analizado las estructuras de los instrumentos de medición para baterías, se puede observar que comparten ciertos patrones en los diagramas de bloques. El primero es que se considera una etapa de almacenamiento y procesamiento de datos para cualquier instrumento; así mismo, se identifica un segundo patrón que consiste en la etapa de adquisición de datos, ya sea voltaje o corriente que permitan la estimación

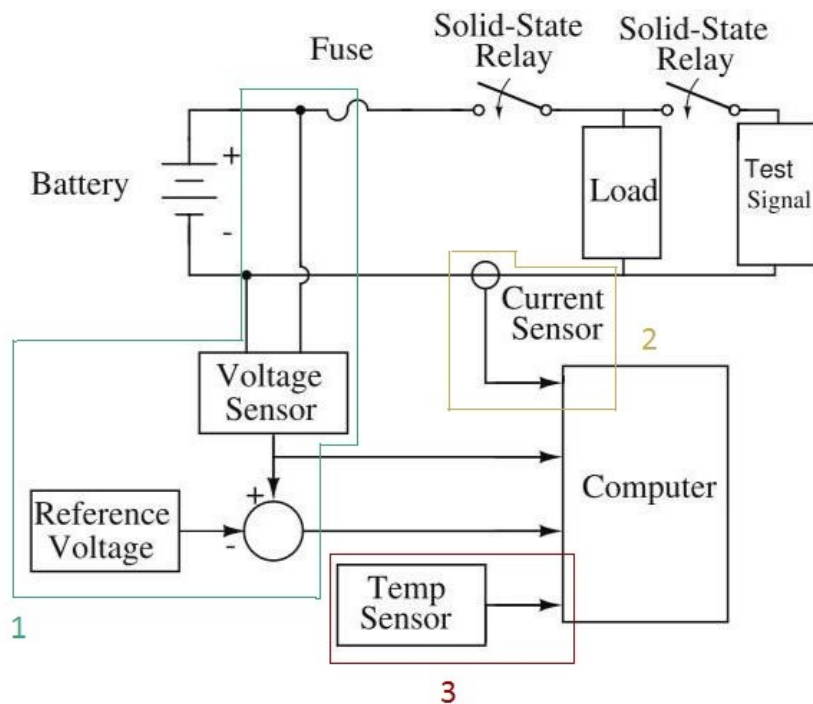


Figura 2.4: Diagrama de bloques de un instrumento de medición que estima el estado de salud y el tiempo de vida de la batería [15].

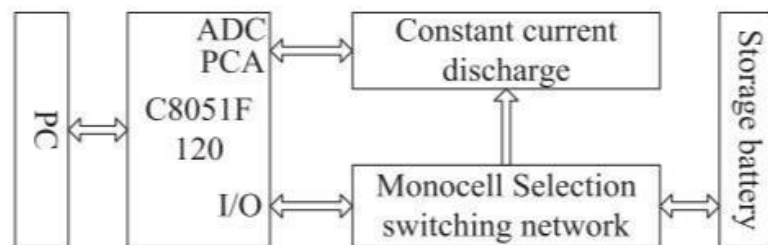


Figura 2.5: Diagrama de bloques de un sistema de medición on-line para baterías plomo ácido [16].

de la capacidad eléctrica de la batería; por último, se identifica un tercer patrón sobre un sistema de control para los métodos de descarga, ya que el voltaje de las baterías varía mientras se descarga. Además, se puede mencionar que hay dos tipos de bloques: los bloques que influyen de manera directa a la estimación de la capacidad eléctrica de la batería y otros bloques complementarios que están para el adecuado funcionamiento del instrumento. Un ejemplo del primer tipo de bloque sería la etapa de adquisición ya que en este bloque se evalúa la incertidumbre de las medidas tomadas para la capacidad

eléctrica. Mientras que, un ejemplo del segundo tipo de bloque sería la etapa de monitoreo de temperatura debido a que las medidas de temperaturas adquiridas no afectan a la estimación de la capacidad eléctrica de la batería.

De este modo, el diagrama propuesto que se desarrollará en el diseño del instrumento debe constituir tener incluido los siguientes bloques:

- Etapa de procesamiento y almacenamiento
- Etapa de adquisición de datos
- Etapa de monitoreo de temperatura
- Etapa de control del método de descarga

El diseño de cada bloque será desarrollado en el capítulo tres a través de los conocimientos adquiridos en los cursos de Circuitos Analógicos, Diseño Electrónico y Circuitos Eléctricos. No obstante, el bloque de control del método de descarga requiere una mayor profundización teórica debido a que es bloque fundamental por el cual se obtendrán los datos para estimar la capacidad eléctrica de las baterías Li-ion y pilas alcalinas.

2.4. Topologías del sistema de control del método de descarga

En la sección 2.1 se evaluaron las ventajas y desventajas de los métodos de estimación de la capacidad eléctrica, por los cuales se establece que el método a utilizar en la presente tesis es el método tradicional de descarga debido a que es práctico y presenta resultados consistentes para baterías Li-ion en sus primeros ciclos de carga y descarga. Así mismo, se definió que había cuatro tipos de descarga: voltaje constante, corriente constante, resistencia constante y potencia constante. Debido a que, por lo general, la medida del consumo de los sistemas realizados en los proyectos académicos o de investigación se utiliza la corriente, el método de descarga a utilizar será el de corriente constante.

El método de descarga a corriente constante consiste en conectar una carga a la batería de tal manera que consuma una corriente constante a pesar de las variaciones del voltaje que haya en la batería, ya que como se revisó en el capítulo 1, el voltaje de referencia de la batería va disminuyendo a medida que se descarga. Para ello, se verán diferentes topologías de circuitos que permitan el control de la corriente constante.

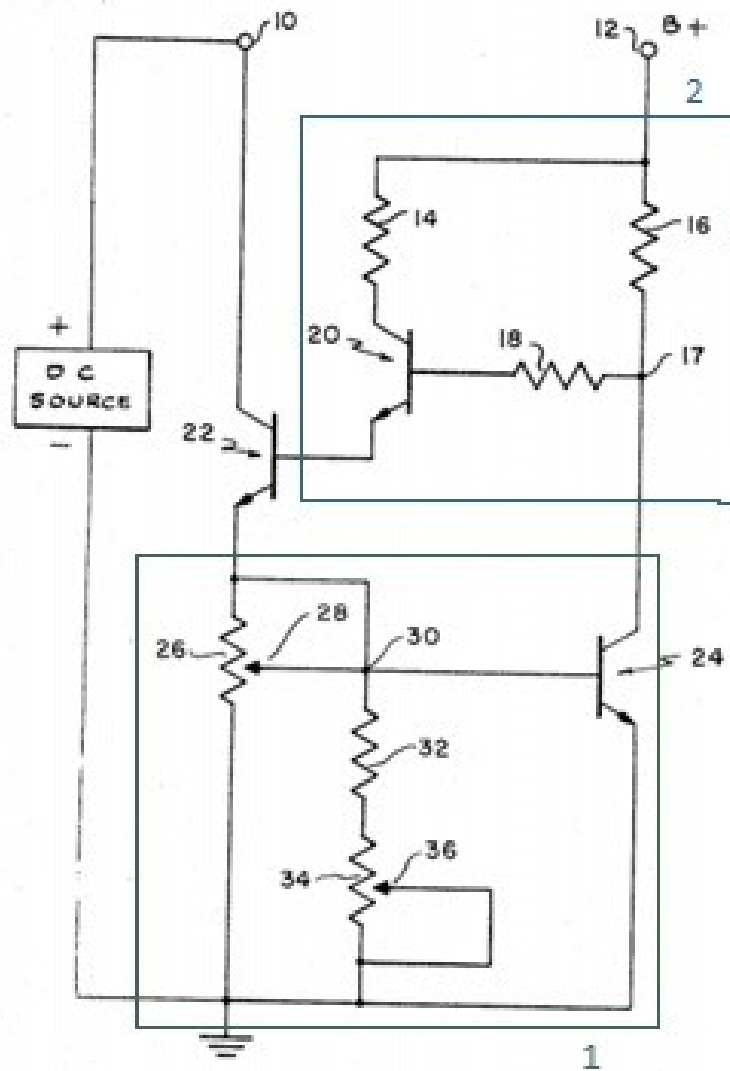


Figura 2.6: Circuito de descarga de corriente constante publicado en la patente de F.E. Ford [17].

Una patente publicada en 1969 por Ford Floyd describe el funcionamiento del control para obtener una descarga de corriente constante. Pues como se aprecia en la figura ??, el terminal positivo de la batería se conecta en el nodo 10 y el terminal negativo a tierra, luego por medio de los bloques 1 y 2 se realiza el control. El bloque 1 sería la realimentación del circuito y el bloque 2 funcionaría como el circuito que activa el transistor 22, el cual permite el paso de la corriente por la carga. La corriente descargada estaría sujeta al voltaje del colector del transistor 24 [17]. Lo fundamental de esta topología es reconocer que se utiliza un transistor NPN para generar la corriente constante; además, existe una realimentación en el sistema para conseguir el control y una etapa de activación para el transistor NPN.

Se presentan 3 topologías adicionales que han formado parte de publicaciones recientes.

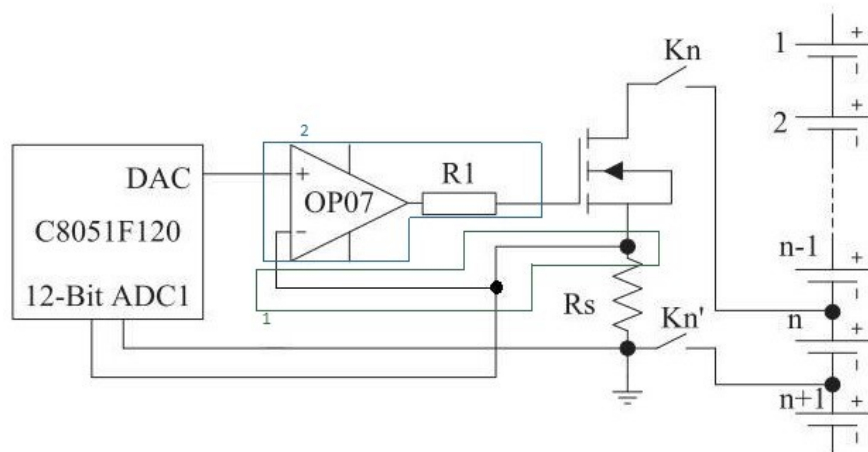


Figura 2.7: Circuito modificado de descarga de corriente constante para una celda de batería [16].

Dado que las tres topologías presentadas en las figuras ?? y ?? pertenecen a sistemas diferentes, es normal encontrar ciertas diferencias. Sin embargo, se rescata las similitudes entre ellos, las cuales fueron resaltadas en cuadro verdes y azules. Todas las topologías presentaron un transistor, sea NPN o Mosfet canal N, que lo utilizan para establecer la corriente constante debido a las características que éstos presentan. Así mismo, el cuadro verde representa la etapa de activación del transistor cuyo componente

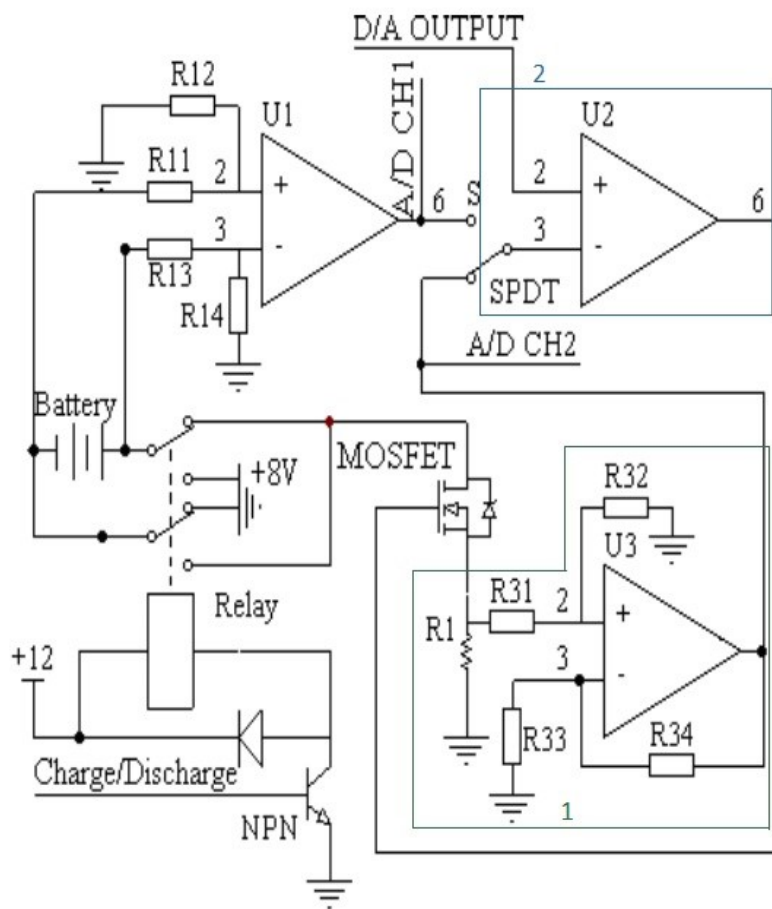


Figura 2.8: Diagrama de un circuito de carga y descarga de baterías [18].

electrónico es el OpAmp y el cuadro azul representa la realimentación del sistema cuya función es fijar un voltaje en la carga de tal manera que pase una corriente constante en todo el tiempo de la descarga [16], [18] .

Por lo tanto, el circuito de control de descarga a corriente constante se podría simplificar de la siguiente manera:

El funcionamiento consiste en tener un OpAmp trabajando de forma lineal de tal manera que al fijar un voltaje en la entrada no inversora () se pueda obtener el mismo valor de voltaje en la entrada inversora. Esto permitiría tener un voltaje estable en la carga , el cual obligaría consumir una corriente constante de la batería (Device Under Test, DUT). Sin embargo, esto solo sucede cuando el transistor está activado y se encuentre en la región activa o región de saturación, ya sea un transistor BJT o un Mosfet respectivamente.

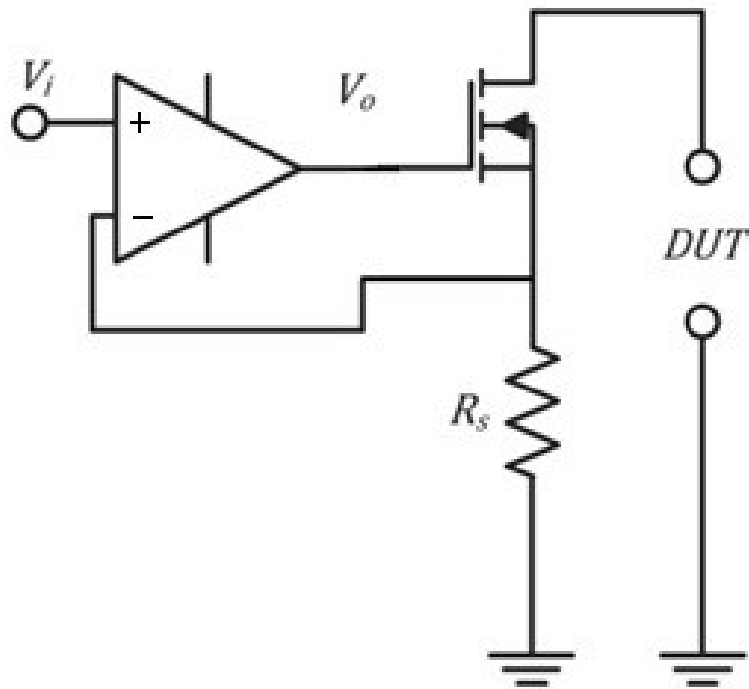


Figura 2.9: Circuito de control de descarga a corriente constante. Elaborado por el autor.

2.5. Evaluación de la incertidumbre

Usualmente se utilizan los componentes electrónicos con sus valores nominales para el diseño de un circuito electrónico; sin embargo, existe una tolerancia asociada a todos los componentes ya que ninguno es ideal, el cual produce una incertidumbre de medida en el circuito. Por lo tanto, se debe profundizar en los conceptos de incertidumbre típica ya que nuestro diseño involucra aspectos de medición.

Primero se identifican las fuentes y tipos de error que existen en las medidas. Éstas pueden ser efectos aleatorios o efectos sistemáticos. Además, esporádicamente pueden aparecer lecturas absurdas, también conocido como lecturas aberrantes. Las lecturas aberrantes son aquellas que rara vez aparecen en la muestra de datos y representan un valor totalmente equivocado de la muestra en general. Por ello, lo recomendable es separar estas lecturas de la muestra de datos adquiridos [19].

Una vez descartadas las lecturas aberrantes, una lectura q_i de una magnitud q se puede

modelar de forma general como se muestra en la ecuación 2.1.

$$q_i = q + b(q) + \chi(q, i) \quad (2.1)$$

Donde $b(q)$ es el efecto sistemático y $\chi(q, i)$ es el efecto aleatorio. Por un lado, el efecto sistemático está constituido por aquellos errores generados por derivas en el instrumento debido a factores que no se pueden controlar (envejecimiento, temperatura, entre otros) o son inherentes al método de medida (efecto de carga). En caso de que se conozca su presencia se debe intentar corregirse antes de analizar la incertidumbre en la medida. Por otro lado, los efectos aleatorios se caracterizan a partir de su función de distribución de probabilidad, tienen valores acotados y su esperanza matemática es nula. Una vez se hayan rechazado las lecturas aberrante y corregido los efectos sistemáticos, la única diferencia entre las lecturas y la magnitud que desea medirse se debe a los efectos aleatorios. El promedio de varias lecturas reduce los efectos aleatorios si es que las lecturas son estadísticamente independientes [19]. En la figura 2.10 se puede apreciar algunos ejemplos para los diferentes tipos de error mencionados.

Fuentes\tipo error		Aberrantes	Sistemáticos	Aleatorios
Factores controlables	Operador	equivocación	Redondeo erróneo	interpolación
	Instrumento	Avería	Error de cero	Ruido propio
	Método	Formulación incorrecta	Efecto de carga	Número de medidas
Factores incontrolables		Interferencias	Interferencias	Ruido y/o interferencias

Figura 2.10: Ejemplos de tipo de error para lecturas aberrantes, efectos sistemáticos y efectos aleatorios [19]

Según la guía para la expresión de la incertidumbre de medida, realizada por el Centro Español de Metrología (CEM) [20], existen dos métodos de evaluación de la incertidumbre típica.

2.5.1. Evaluación tipo A de la incertidumbre típica

Esta evaluación se basa en métodos estadísticos y requiere de un conjunto de medidas. Para que el método sea válido, las condiciones de las medidas no deben cambiar a lo largo de la prueba. Además, las diferentes lecturas deben ser estadísticamente independientes entre sí [20]. Por lo tanto, los pasos que se deben realizar para determinar la incertidumbre típica mediante este método son los siguientes:

1. Corregir los efectos sistemáticos
2. Tomar N medidas independientes
3. Eliminar las lecturas aberrantes
4. Calcular la media aritmética
5. Calcular la desviación típica ajustada
6. Determinar la incertidumbre típica

Este método es especialmente útil con el prototipo del instrumento ya que se van adquirir muchas cantidades de muestras por un periodo de tiempo. A partir de este método se determinará la incertidumbre típica o desviación típica experimental de la medida para luego ser comparado con la incertidumbre que se determinó en el diseño del instrumento.

2.5.2. Evaluación tipo B de la incertidumbre típica

La evaluación tipo B de la incertidumbre típica está más orientado a estimar magnitudes que no son obtenidas a partir de un conjunto de medidas. Es decir que, a través de métodos de estadística, se estima la incertidumbre de una magnitud a partir de toda la información disponible que se tenga de ésta. Para el diseño de un circuito, que realiza la estimación de la capacidad eléctrica de una batería, es posible utilizar este método de evaluación ya que la magnitud a estimar está relacionada por conceptos matemáticos-eléctricos [20].

Los pasos a realizar para determinar la incertidumbre típica de la capacidad eléctrica que puede proveer una batería son los siguientes [20]:

1. Identificar todas las variables independientes eléctricas entre sí que estén relacionadas con la magnitud a estimar
2. Asignar una función de probabilidad a cada variable eléctrica identificada y hallar su incertidumbre típica
3. Hallar el coeficiente de sensibilidad de cada variable eléctrica identificada
4. Luego se debe obtener la incertidumbre de cada variable independiente multiplicando su incertidumbre típica con su respectivo coeficiente de sensibilidad
5. Determinar la incertidumbre típica de la magnitud a estimar por medio de la raíz cuadrada de la suma de cada incertidumbre independiente al cuadrado.

2.6. Estándares para descarga de baterías

Los instrumentos de medición y descargas de baterías son regidos por estándares a nivel internacional que son establecidos por organizaciones como IEC (International Electrotechnical Commission), ANSI (American National Standards Institute), SAE (Society of Automotive Engineers), entre otros.

El prototipo que se diseñará en la presente tesis no tendrá como objetivo obtener certificados oficiales por parte de estas organizaciones. Sin embargo, se toma en consideración que existen estos estándares con la finalidad de obtener los mejores resultados posibles. En la tabla 5 se muestra los diferentes estándares que se aplicaría al instrumento de medición.

Capítulo 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

3.1. Objetivo del diseño

El presente capítulo tiene como objetivo proponer un diagrama de bloques, los criterios de selección de los componentes para cada bloque, los diagramas de flujo del programa y la implementación de la tarjeta electrónica que tendrá el instrumento de medición. Así mismo, recordar que el objetivo de la tesis es diseñar y desarrollar un instrumento de bajo costo que permita estimar la capacidad eléctrica que proveen los bancos de baterías basados en baterías Li-ion y pilas alcalinas.

3.2. Diagrama de bloques

De acuerdo a las estructuras de los instrumentos de medición revisados en la sección 2.3 se propone el diagrama de bloques mostrado en la figura 3.1.

CP: Componente Principal

CS: Componente Secundario

DUT: Dispositivo bajo prueba

La adquisición de datos durante la descarga de la batería es parte fundamental del sistema, por lo que se clasificará el diagrama de bloques en componentes principales y componentes secundarios. Por un lado, los componentes principales serán aquellos que influyan en cierta medida con la estimación de la capacidad eléctrica, los cuales son

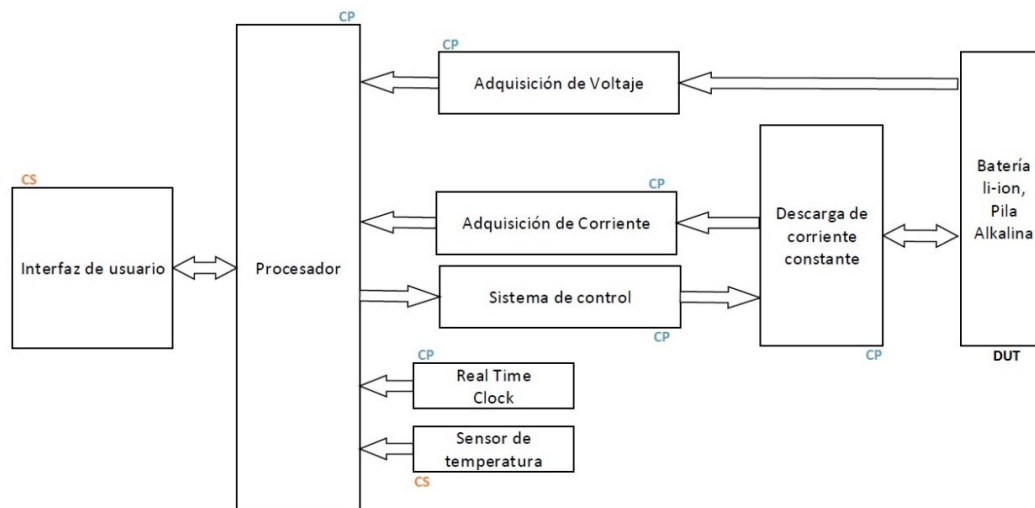


Figura 3.1: Diagrama de bloques propuesto para el diseño de un instrumento de medición que estime la capacidad eléctrica de la batería

constituidos por los bloques: Adquisición de Voltaje, Adquisición de Corriente, Sistema de Control, Descarga de Corriente Constante, Real Time Clock y Procesador. Por otro lado, los componentes secundarios serán aquellos que no influyan en la estimación de la medida, pero si contribuirán para el adecuado desempeño del instrumento y están conformados por los bloques: Interfaz de usuario y Sensor de Temperatura.

Descripción del diagrama de bloques

La función general del diagrama de bloques comienza por el bloque de interfaz de usuario debido a que éste es el encargado de la interacción entre el instrumento y el usuario. Este bloque está conformado por periféricos de entrada y de salida, tales como: teclado numérico, display BCD 7 segmentos, display LCD 16x2, keypad 4x4, entre otros. El usuario a través estos periféricos tendrá acceso a un menú donde ingresará la corriente que desee descargar la batería. Una vez ingresado la corriente, el bloque Procesador será el encargado de tomar esta información y condicionarla para realizar la descarga de corriente constante a la batería. El bloque de Descarga de corriente constante y el bloque de Sistema de control cumplen con la función de mantener la descarga constante a pesar de las variaciones que se pueda presentar en la batería. Así mismo, mientras se va realizando la descarga, el procesador recolecta la información pertinente de la descarga por medio de los bloques de Adquisición de Voltaje y Adquisición de Corriente. El bloque de Sensor de Temperatura cada periodo de tiempo envía la información al blo-

que Procesador con la finalidad de saber la temperatura promedio del sistema durante toda la medición. Luego, el bloque de Real Time Clock, o también conocido como reloj externo, tiene el objetivo de brindarle al procesador los intervalos de tiempo de las adquisiciones de datos que vaya a realizar. Una vez almacenado toda esta información en memoria, el usuario a través del menú podrá acceder a la opción de transferir los datos a una computadora.

3.3. Requerimientos para el diseño

Los requerimientos del sistema están basados según la funcionalidad que tendrá el instrumento por parte de los usuarios. En este caso, se planteó que los usuarios estén conformados por los estudiantes de la especialidad de Ingeniería Electrónica; ya que, en gran medida, los proyectos que realizan tienen una batería como fuente de alimentación. Por lo tanto, se establecen los siguientes requerimientos de las características principales del instrumento tomando como referencia la información expuesta en la sección 2.2:

Rango de voltajes de la batería: El rango de voltajes de la batería está definido por las baterías con mayor voltaje de referencia usado en los proyectos de los estudiantes. Por lo general, las baterías de 9V son más utilizadas y con el mayor voltaje de referencia. Por ello, el rango de voltajes de la batería será de 0 a 9V.

Fuente de alimentación: El rango de descarga de corriente debe estar entre 0 y 2A, ya que éste es el rango que manejan los bancos de baterías actualmente en el mercado.

Resolución: Se busca que la resolución del instrumento sea la más pequeña posible, por ejemplo: 100 nA, 0.01 mA o 1 mA. Sin embargo, estas resoluciones son manejadas por instrumentos costosos en el mercado actual. Por ello, se buscará obtener al comienzo una resolución de 1 mA para que los usuarios tengan mayor precisión en el uso del instrumento.

Exactitud: La exactitud de los instrumentos de medición representa el porcentaje de desviación de la medida realizada. Para el diseño del instrumento de la tesis, se buscará que no sea mayor al 10 % debido a que el rango de error en la adquisición de datos no

debería ser considerable.

Rango de operación de Temperatura: El rango de operación de temperatura del instrumento será la temperatura ambiente de los laboratorios.

Interfaz de Usuario: La interacción entre el usuario y el instrumento será entre periféricos de entrada y visualizadores. Estos periféricos de entrada pueden ser: teclado número, teclado alfanumérico, botones, entre otros. Los visualizadores deben cumplir la función de mostrar las opciones de funcionamiento del instrumento, los cuales pueden ser: display LCD 2x40, pantalla VFD 16x2, monitor externo, entre otros.

3.3.1. Sistema de Control y Descarga de Corriente Constante

3.3.2. Control Digital y Adquisición de Voltaje y Corriente

3.3.3. Sensor de Temperatura e Interfaz de Usuario

3.3.4. Procesador y Reloj de Tiempo Real

3.3.5. Diagrama de Flujo

3.3.6. Implementación

Bibliografía

- [1] Christopher Mims, “Tech World Vexed by Slow Progress on Batteries.”
- [2] I. Buchman, *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*. Cadex Electronics Inc., third edit ed., 2001.
- [3] Mpampas122321, “6V DC Motor Battery,” 2014.
- [4] Elieteyssedou, “2100 mAh - Raspberry Pi 3 B,” 2016.
- [5] MIT - Massachusetts Institute of Technology, “A Guide to Understanding Battery Specifications,” 2008.
- [6] D. Ferrer Alayeto and A. Cuadras Tomás, *Circuito para la medición de la carga y la salud de baterías*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [7] Battery University, “BU-904: How to Measure Capacity – Battery University,” 2016.
- [8] B. university, “Capacity loss and discovering what causes a battery to fade - Battery University,” 2016.
- [9] C. company, “Cadex C7600.”
- [10] C. Company, “Cadex C8000 Technical Specifications.”
- [11] National Instruments, “20 V , 2 A Source Measure Unit,” 2000.
- [12] KEITHLEY a Tektronix Company, “Series 2380 Programmable DC Electronic Loads Programmable DC Electronic Loads.”
- [13] Maynuo Electronic, “Maynuo Electronic Co ., Ltd—M9100 Multi Solar Battery Test System | Electronic Load | Power Sources Maynuo Electronic Co ., Ltd—M9100 Multi Solar Battery Test System | Electronic Load | Power Sources.”
- [14] J. Tinnemeyer, “Fuzzy logic method and apparatus for battery state of health determination.”

- [15] A. Harris, P. O'Connor, and R. W. Cox, "A time-domain approach for monitoring battery state of health (SOH) and remaining useful life (RUL)," *Proceedings, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3083–3087, 2015.
- [16] L. Ping, "VRLA batteries internal resistances on-line measurement based on twice constant discharge method," *IET International Conference on Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012)*, vol. 1, pp. 2.36–2.36, 2012.
- [17] Ford Floyd E., "Constant current sink circuit," 1966.
- [18] J. Qiu, R. Chen, B. Tang, and H. Wei, "Multi-channel high precision battery test system," *2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI*, pp. 1932–1935, 2007.
- [19] M. Ángel, G. González, J. R. Castro, and P. J. R. Costa, "Estimación de la incertidumbre en la medida, UPC," *Estimación de la Incertidumbre en Sistemas de Instrumentación*, pp. 43 – 94, 2006.
- [20] CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGIA, "Evaluación de datos de medición Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida," 2008.