



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

TEMA: DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA USADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUSTANCIAS EXPLOSIVAS.

AUTOR: SIGCHA PILATUÑA, WILSON NICOLÁS

DIRECTOR: INGENIERO TORRES TELLO, JULIO WLADIMIR

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA USADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUSTANCIAS EXPLOSIVAS**" fue realizado por el señor **SIGCHA PILATUÑA WILSON NICOLÁS** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolqui, 14 de Agosto del 2018

Firma:

Ing. Julio Wladimir Torres Tello

C.C: 1716840390



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **SIGCHA PILATUÑA WILSON NICOLÁS**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "**DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA USADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUSTANCIAS EXPLOSIVAS**" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 14 de Agosto del 2018

Firma:

Wilson Nicolás Sigcha Pilatuña

C.C: 1722447412



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

#### AUTORIZACIÓN

Yo, **SIGCHA PILATUÑA WILSON NICOLÁS** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA USADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUSTANCIAS EXPLOSIVAS"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 14 de Agosto del 2018

Firma:

Wilson Nicolás Sigcha Pilatuña

C.C: 1722447412

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Wilson y Magdalena, que con su ejemplo de perseverancia y responsabilidad que me han inculcado he podido hacer frente a las adversidades en mi vida.

A Irene, por su amor y comprensión durante mi carrera universitaria.

A mi hermana Andrea, que con su espontaneidad y alegría logró sacarme una sonrisa en momentos difíciles.

Wilson N. Sigcha P.

## AGRADECIMIENTO

A nuestro creador, por darme fortaleza, sabiduría y tenacidad durante estos años de estudio.

A mis padres, que han sido la base fundamental en mi realización como profesional y persona, por enseñarme los valores y principios que hoy en día rigen mi vida.

A Irene, por ser la mujer que ha sabido cautivar mi corazón, por ser la persona con quien puedo contar en los buenos y malos momentos.

A mis amigos, que han brindado su apoyo y por compartir conmigo innumerables anécdotas.

Al Ing. Julio Torres, por compartir sus conocimientos y brindar un gran apoyo durante la realización del proyecto, deseándole éxitos en su vida profesional.

Wilson N. Sigcha P.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xi
CAPITULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e importancia.....	4
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo General.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
CAPITULO 2.....	7
ESTADO DEL ARTE .....	7
2.1. Robótica Móvil .....	7
2.1.1. Terminología y definiciones .....	9
2.2. Baterías .....	11
2.2.1. Terminología y Definiciones: .....	13
2.2.2. Modelamiento de la batería .....	16
2.3. Estado de Carga de Baterías .....	22
2.3.1. Medición directa .....	22
2.3.2. Estimación tradicional.....	24
2.3.3. Sistemas adaptativos.....	25
2.4. Sistemas embebidos .....	26
2.4.1. Sistemas operativos en tiempo real.....	27

CAPITULO 3.....	31
ALGORITMO DE MEDICIÓN DE ESTADO DE CARGA.....	31
3.1. Análisis del método de Coulomb .....	31
3.1.1. Desarrollo del modelo matemático basado en el conteo de Coulomb. ....	31
3.2. Aplicación del método de conteo de Coulomb.....	33
3.2.1. Implementación del algoritmo en sistemas embebidos .....	36
3.3. Diagrama de Flujo de la medición del estado de carga:.....	38
CAPITULO 4.....	43
DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA LA PLATAFORMA DAGU WILD THUMPER.....	43
4.1. Acondicionamiento del dispositivo de medición en el robot móvil. ....	43
4.1.1. Diseño de módulo para acoplamiento de tensión en el sistema de almacenamiento de energía eléctrica. ....	45
4.2. Diseño de la estrategia de control basada en reglas para el robot móvil Dagu Wild Thumper .....	51
4.2.1. Etapa de control: .....	51
4.2.2. Etapa de potencia:.....	59
4.3. Cálculo para duración de batería recargable en el robot Dagu Wild Thumper .....	62
4.4. Montaje de elementos en la plataforma Dagu Wild Thumper. ....	63
4.5. Implementación de la estrategia de control basada en reglas con el algoritmo de estimación del estado de carga. ....	66
CAPITULO 5.....	73
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	73
5.1. Primera Fase Pruebas: Medición de corriente con sensor Acs – 712. ....	73
5.2. Segunda fase de pruebas: Medición de estado de carga.....	78
5.3. Tercera fase de pruebas: Funcionamiento de los algoritmos de estado de carga y de control de reglas en el robot Dagu Wild Thumper. ....	81
CAPITULO 6.....	85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
6.1. Conclusiones: .....	85
6.2. Recomendaciones:.....	87
BIBLIOGRAFÍA.....	88



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Robot móvil Sojourner Rover NASA. Fuente: (NASA, 2018).....	9
<b>Figura 2.</b> Componentes internos de una batería. Fuente: (Viera Perez, 2003).....	12
<b>Figura 3.</b> Pirámide de niveles de categorización para el modelamiento de una batería. Fuente: (Chang, 2013) .....	17
<b>Figura 4.</b> Modelo de batería simple Fuente: (Sobczack & Samoyalyk, 2013).....	19
<b>Figura 5.</b> Modelo de batería de Thevenin Fuente: (Samolyk & Sobczak, 2013).....	21
<b>Figura 6.</b> Multitarea cooperativa Fuente: (Barry , Mastering the FreeRTOS, 2016).....	29
<b>Figura 7.</b> Multitarea preferencial Fuente: (Barry , Mastering the FreeRTOS, 2016) .....	30
<b>Figura 8.</b> Corriente de carga hacia el robot móvil y corriente de descarga .....	32
<b>Figura 9.</b> Diagrama de flujo para medir el estado de carga de baterías LiPo con capacidad de 9000 mAh.....	39
<b>Figura 10.</b> Distribución de pines dentro de la plataforma Arduino .....	57
<b>Figura 11.</b> Robot de detección de sustancias explosivas Dagu Fuente: (Alejandro & Venegas, 2017) .....	58
<b>Figura 12.</b> Fuente de alimentación de energía eléctrica principal.....	61
<b>Figura 13.</b> Módulo de Relés para Arduino. ....	62
<b>Figura 14.</b> Vista superior anversa de la plataforma Dagu.....	63
<b>Figura 15.</b> Vista superior anversa de la plataforma Dagu.....	64
<b>Figura 16.</b> Vista superior reversa de la plataforma Dagu.....	64
<b>Figura 17.</b> Vista lateral reversa de la plataforma Dagu.....	65
<b>Figura 18.</b> Vista superior anversa de la plataforma Dagu.....	65
<b>Figura 19.</b> Vista superior del robot de detección de sustancias explosivas. ....	66
<b>Figura 20.</b> Diagrama de flujo del algoritmo de control de reglas.....	67
<b>Figura 21.</b> Código usado para realizar medición de corriente a través del conversor análogo a digital de Arduino.....	74
<b>Figura 23.</b> Medición de estado de carga en función de su corriente y voltaje.....	78
<b>Figura 24.</b> Cargador LiPo de 7.4 V ImaxRC Fuente: (Allegro, 2014).....	79
<b>Figura 25.</b> Mediciones de diferentes corrientes eléctricas y su comportamiento en estado de carga.....	80
<b>Figura 26.</b> Funcionamiento de algoritmo de control de reglas .....	81
<b>Figura 27.</b> Tiempo inicial y final de duración de la batería del robot dagu. ....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Características de elementos para determinar el estado de carga</i> .....	36
<b>Tabla 2</b> <i>Tabla de asignación de variables y constantes</i> .....	40
<b>Tabla 3</b> <i>Elementos que conforman el robot de sensado químico Dagu Wild Thumper</i> .	44
<b>Tabla 4</b> <i>Características técnicas para módulos de robot Dagu</i> .....	48
<b>Tabla 5</b> <i>Características técnicas de los convertidores DC – DC a usarse dentro del proyecto</i> .	50
<b>Tabla 6</b> <i>Condiciones en función de porcentaje de batería</i> .....	52
<b>Tabla 7</b> <i>Control de cargas en función de porcentaje de baterías</i> .	53
<b>Tabla 8</b> <i>Mediciones de corriente de cada módulo</i> .....	59
<b>Tabla 9</b> <i>Tabla de variables de control para algoritmo de reglas</i> .	68
<b>Tabla 10</b> <i>Tabla de prioridades</i> .....	72
<b>Tabla 11</b> <i>Tabla de datos para medición de sensado de corriente del módulo de visión remota</i> .....	75
<b>Tabla 12</b> <i>Datos estadísticos para módulo de sensado químico</i> .....	76
<b>Tabla 13</b> <i>Datos estadísticos para módulo de navegación</i> .....	76
<b>Tabla 14</b> <i>Datos estadísticos para módulo de visión remota</i> .....	77
<b>Tabla 15</b> <i>Datos estadísticos para módulo de movimiento</i> .....	77
<b>Tabla 16</b> <i>Datos estadísticos para módulo de procesamiento</i> .....	77
<b>Tabla 17</b> <i>Tabla de análisis de consumo de corriente, intervalos de funcionamiento y duración de baterías</i> .....	83

## RESUMEN

El proyecto de investigación consistió en diseñar una estrategia de control energético para el robot Dagu usado para la identificación de sustancias explosivas que basándose en la medición del estado de carga de las baterías permita regular el funcionamiento de las baterías obteniendo un aumento en el tiempo de funcionamiento en un ciclo de carga. Para lograr esto, inicialmente se separó cada uno de los elementos para redistribuirlos en forma de módulos, de tal manera que posean características de funcionamiento similares. Además se diseñó e implementó un algoritmo de estimación de estado de carga a través del método de conteo de amperios hora, de tal manera que se obtenga una variable de salida con la cual el algoritmo de control sea capaz de regular la cantidad de energía eléctrica restante en las baterías de polímero de litio. Durante la fase de implementación de los algoritmos se utilizó una programación basada en sistemas operativos en tiempo real, que ofrecen un mejor desempeño en la ejecución de tareas. Este procedimiento se llevó a cabo dentro del microcontrolador que rige el movimiento y sensado químico. Por último se estableció una comparación del funcionamiento del algoritmo antes y después de la ejecución del control de reglas, en el que se obtuvo un incremento en la autonomía de la batería del 57% durante un ciclo de carga completa.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ESTADO DE CARGA**
- **GESTIÓN ENERGÉTICA**
- **SISTEMA OPERATIVO EN TIEMPO REAL**

## ABSTRACT

The research project consisted in the designing of an energy control strategy for the Dagu robot used of the identification of explosives which was based on the measurement of the battery state of charge (SOC) that allows to regulate the operation of each electronic elements, to obtain an increase in the operating time in a given charging cycle. To achieve this, initially each element was separated them in modules, in such a way that they possess similar performance characteristics. In addition to the design and implementation of an algorithm to estimate the state of charge using the ampere hour count method, in order to obtain an output variable, for the control algorithm is able to regulate the amount of electrical energy remaining in the LiPo batteries. During the implementation phase of the algorithms, a programming based on real-time operating systems was used, which offers better performance in the execution of tasks. This procedure was carried out within the microcontroller that governs the movement and chemical sensing of the robot. Finally, a comparison of the functioning of the algorithm is established before and after the execution of the control strategy, obtaining an increase in the battery's autonomy of 57% during a full load cycle.

### **KEYWORDS:**

- **STATE OF CHARGE**
- **ENERGY MANAGEMENT**
- **REAL-TIME OPERATING SYSTEM**

## CAPITULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### **1.1. Antecedentes**

La electricidad se ha considerado generalmente como un foco de atracción llamativo para el público en general. En este sentido, especialmente la electrónica, ha encontrado diversas áreas de aplicación en entornos, que buscan atraer la atención del público, tales como grupos investigativos, eventos o congresos. Al margen de ello, hoy en día se busca generar sistemas electrónicos autónomos que respondan a términos como eficiencia energética, inteligencia artificial entre otros. (Samolyk & Sobczak, 2013) El progreso tecnológico en la industria electrónica acarrea muchos desafíos, ya que a pesar de que el rendimiento de los dispositivos crece exponencialmente, su tamaño se minimiza constantemente para satisfacer las necesidades modernas de los clientes. (Barth, Dy, Farrell, & Pang, 2001) Años atrás, el término “portátil” al hablar de aparatos electrónicos solía ser un concepto particularmente extraño, hoy en día la necesidad lo ha convertido en un estándar imprescindible. Tanto que surge un requisito fundamental para dispositivos electrónicos y esta es la necesidad de un almacenamiento portátil confiable: una batería. (Chiasson & Variamohan, 2006) La batería es probablemente el dispositivo de almacenamiento de energía más utilizado.

A pesar de su importancia, muchos desafíos siguen sin resolverse para caracterizar y administrar la batería. Entre ellos, un tema fundamental es la estimación de su estado de carga (SOC de sus siglas en inglés State Of Charge). Guasch y Silvestre (2003) en su trabajo proponen que el estado de carga se debe considerar como un indicador de la

carga eléctrica almacenada por la batería, lo que se representa numéricamente como un valor entre 0 y 1, en él que se enuncia que cuando el SOC es la unidad, la batería no puede aceptar más energía del sistema, ya que no puede exceder la capacidad de almacenamiento de carga eléctrica. De hecho el SOC no se puede medir directamente con ningún sensor, por lo tanto se debe deducir mediante modelos matemáticos o a su vez con modelos de aproximación alternativa, y aunque se han desarrollado grandes avances investigativos, el reto consiste en reducir los errores de estimación, ya que la no linealidad y el comportamiento de la tensión de la batería durante el funcionamiento no se consideran y los acarrees de ciertos errores actuales se acumulan (González-Longatt, 2006). Por tanto la estimación de SOC representa un parámetro muy importante para una estrategia de control de energía de un sistema electrónico. (Chang, 2013)

En la actualidad existen muchos intentos para estimar el SOC de baterías recargables, al sintetizar modelos de circuitos basados en voltaje medido y corriente en los terminales de la batería. Por ejemplo, Barth, Dy, Farell y Pang (2012) usan un filtro de Kalman extendido combinado con una red RC, lo que ofrece una opción computacionalmente eficiente para la evaluación SOC en tiempo de ejecución en vehículos. (Xiao, Shi, & He, 2010) Las baterías recargables se utilizan cada vez más en diversos aparatos tales como: vehículos híbridos y eléctricos, robots, telefonía móvil, etc. Es necesario tener en consideración términos relacionados a eficiencia y vida útil; para el funcionamiento adecuado en condiciones normales para evitar fugas térmicas, envejecimiento y daño físico. (González-Longatt, 2006)

Gholam-Abbas y Pistoia (2009) desarrollaron un sistema de administración de batería (BMS del inglés *Battery Management System*). Este trabajo posee la capacidad de evaluar, estimar y controlar con precisión el estado de carga de la batería, estado de salud (SOH del inglés *State of Health*) y temperatura central. Estos parámetros permiten al sistema determinar la estrategia operativa óptima, dicho de otro modo este sistema ofrece una gestión de carga (LM del inglés *Load Management*) de modo que la duración de la batería sea maximizada. Paracha y Doulai (1998) definen a un sistema de gestión de carga (LMS del inglés *Load Management System*) como un conjunto de objetivos diseñados para controlar y modificar directa o indirectamente los patrones de uso eléctrico para reducir la demanda máxima. Esta modificación permite crear un sistema de suministro para satisfacer la demanda de energía eléctrica haciendo un mejor uso de su capacidad disponible de generación y transmisión de electricidad. En contraste con Paracha Z y Doulai P (1998) un estudio realizado por Samra, Toro y Sim (1995) resalta ventajas de poseer una gestión de carga eléctrica, en el que se afirma que como resultado se obtienen sistemas eléctricos confiables y eficientes. En el mundo moderno, la administración de la energía es un tema importante, tanto así que un manejo exitoso de la carga eléctrica produce diversos beneficios. Harrington (2003) a su vez muestra varias características cuando se analizan sistemas de gestión de carga para describir condiciones en función de su demanda como magnitud de uso de energía eléctrica, demanda de carga, variación de la demanda en el tiempo, valores mínimos y máximos de la demanda y duración de la carga mínima y máxima. Killicote y Piette (2005) enfatizan tres puntos para mejorar la gestión de carga: identificación de carga máxima, demanda máxima y eficiencia energética.

Además afirman que una gestión de carga basada en la demanda mejora la eficiencia del sistema de suministro eléctrico, y en algunas aplicaciones como medida para ahorrar energía. En complemento Bellarmine (2000) propone limitar la demanda de energía eléctrica fijando una dependencia de los recursos disponibles, tiempo de uso y precios de electricidad.

Durante el presente trabajo investigativo se realizó el diseño de una estrategia de control basado en reglas, que permita administrar las cargas eléctricas en función de la estimación del estado de carga para un sistema de almacenamiento de energía para una plataforma robótica usada en la identificación de sustancias explosivas.

## **1.2. Justificación e importancia.**

Las baterías recargables desempeñan un papel importante en el desarrollo y uso de la energía eléctrica para dispositivos tales como vehículos híbridos, robots, telefonía móvil entre otros aparatos electrónicos. De hecho según Trinh (2012) el rendimiento en las baterías, que se encuentran dentro de los diferentes dispositivos electrónicos, debe ser lo más alto posible para asegurar la mejor autonomía energética. Debido a que la cantidad de energía eléctrica almacenada dentro de una batería es limitada, la batería es sometida a ciclos de carga y descarga. Si este procedimiento se llevara a cabo de manera incorrecta se puede reducir la vida útil de la batería.

En su libro Berrueta (2017) afirma que muchas variables de estado de la batería como SOC y SOH se monitorean con precisión para permitir un control inteligente destinado a optimizar el rendimiento del sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Si el control



de demanda de la batería no es rigurosa, se necesitaría de una batería más grande para cumplir con los mismos requisitos operativos, lo cual incrementaría el costo del sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Por lo tanto, una estrategia de control que se base en la estimación del estado de carga es necesaria para poder mantener el rendimiento de la batería en condiciones óptimas.

En este trabajo, se pretendió contribuir al proyecto de investigación pic-2016-009 institucional desarrollado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE “LOCALIZACIÓN DE TNT Y PÓLVORA BASE DOBLE A TRAVÉS DE SENSADO QUÍMICO EN UN ENTORNO CONTROLADO MEDIANTE ROBÓTICA COOPERATIVA. (SmellRobSense)”, al diseñar un sistema que ha permitido:

- Estimar el estado de carga de la batería de la plataforma robótica Dagu Wild Thumper.
- Plantear estrategias de control basadas en reglas que permitan regir sobre las cargas eléctricas en base a la cantidad restante de energía eléctrica en la batería LIPO en la plataforma móvil Dagu Wild Thumper.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Diseñar una estrategia de control basada en reglas para las cargas eléctricas presentes en el robot móvil Dagu Wild Thumper usado para identificar sustancias explosivas.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Desarrollar un algoritmo basado en el método de conteo de Coulomb para la estimación del estado de carga del robot móvil Dagu Wild Thumper.
- Implementar un módulo complementario que permita realizar la estimación del estado de carga en la plataforma robótica Dagu Wild Thumper.
- Embeber el procesamiento de la estimación del estado de carga de la batería LIPO en la plataforma robótica Dagu Wild Thumper.
- Comparar la autonomía de energía eléctrica del robot Dagu Wild Thumper con la estrategia de control y sin la misma.

## CAPITULO 2

### ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describe a detalle las definiciones necesarias para el desarrollo del presente proyecto de investigación, entre los cuales se tiene los siguientes tópicos tales como: robótica móvil, baterías, estado de carga, sistemas embebidos y sistemas operativos en tiempo real.

#### **2.1. Robótica Móvil**

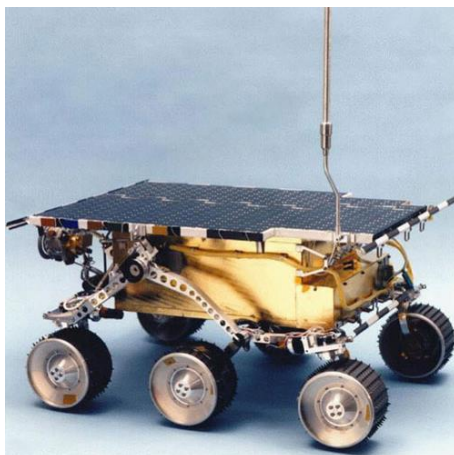
La robótica es considerada actualmente una rama tecnológica que se dedica al diseño, ensamblaje y aplicación de dispositivos llamados “robots”. Como tal la robótica combina múltiples campos: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial, la ingeniería de control. (Ramirez Rivera & Reyes Perez, 2015) El término robótica es acuñado por Isaac Asimov, definiéndola así como la ciencia que estudia a los robots, por otro lado el gran desarrollo adquirido por la robótica ha permitido establecer la robótica móvil, ya que anteriormente se llegaba al análisis de una estructura mecánica fija. (Barrientos Balager, 2018)

La robótica móvil tiene su auge de desarrollo en la década de los ochenta donde aprovechándose de la tecnología computacional, permitió la interacción con sensores, mecanismos y diferentes sistemas de control. Un robot móvil es aquel que puede desplazarse de manera autónoma o tele-operada sobre distintos ambientes. (Ramirez Rivera & Reyes Perez, 2015)

Dentro de la robótica móvil se pueden encontrar diferentes tipos de clasificación, entre los cuales se tiene:

- En función del grado de manejo: Se lo puede identificar de acuerdo a si el robot es autónomo o teleoperado.
- En función del ambiente en el que se desarrollan: Se lo puede identificar de acuerdo al medio donde interactúan ya sea aéreo, marítimo o terrestre. (Ramirez Rivera & Reyes Perez, 2015)
- En función del sistema de locomoción: Se lo puede identificar de acuerdo a como se desplacen. El más conocido es el sistema de locomoción diferencial caracterizado porque el movimiento se consigue con dos ruedas, acopladas cada una a su propio motor. De esta forma se logra que el robot avance en línea recta, al fijar ambos motores a la misma velocidad, también se lo puede hacer girar en una u otra dirección haciendo uso de diferentes velocidades. (Chavez Gonzales , 2012)

La robótica móvil ofrece versatilidad para trabajos que conlleven una localización remota, o a su vez en tareas que sean difíciles de automatizar y que se relacionen con entornos no estructurados riesgosas para la salud humana, así también la robótica móvil presenta su mayor reto al tratar de generar trayectorias idénticas y movimientos a partir de la información adquirida por sensores, en la que se obtiene el movimiento entre dos puntos geográficamente distantes. (Arias Armijos, 2017)



**Figura 1.** Robot móvil Sojourner Rover NASA.  
Fuente: (NASA, 2018)

Un claro ejemplo de la aplicación de la robótica móvil es el robot de la NASA Sojourner Rover mostrado en la Figura 1, lanzado desde el planeta Tierra hacia Marte en Diciembre del 1996, con la tarea de analizar los compuestos de las rocas del suelo del planeta Marte. Este robot claramente fue de gran ayuda en la investigación para la comunidad científica, ya que permitía el estudio de los compuestos químicos remotamente hacia los laboratorios de la NASA ubicados en Columbia Estados Unidos. (NASA, 2018)

### **2.1.1. Terminología y definiciones**

La Organización Internacional para la Estandarización provee su definición de robot en la norma ISO 8373: “Un manipulador automáticamente controlado, reprogramable, multiuso, programable en tres o más ejes, que pueden estar fijos en un lugar o moverse para ser usado en aplicaciones de automatización industrial”. (Chavez Gonzales , 2012)

En general, un robot móvil, posee las siguientes características:

- Ser reprogramable.
- Poseer movilidad de sus articulaciones.
- Capacidad de movimiento alrededor de su entorno.
- Capacidad de reconocer su medio ambiente a través de sensores.

Una manera sencilla de describir un robot es mediante un controlador que lo comanda remotamente, el cual ejecutará cada una de las órdenes correspondientes previamente programadas, en la que se enviará información de su estado y del entorno en el cual se encuentra. (Barrientos Balager, 2018) Dentro de este proceso existen varios elementos que intervienen y que son vitales para su funcionamiento (Chavez Gonzales , 2012):

- Operador o teleoperador: Es aquel que realiza a distancia el control de la operación del robot móvil. Su acción puede ir desde un control continuo hasta una intervención intermitente, con la que únicamente se ocupa de monitorizar cada cierto tiempo.
- Interfaz: Recopila y envía información para su procesamiento.
- Control y canales de comunicación: Establece un medio de intercambio de datos entre el operador y el robot móvil, de tal manera que pueda transferir información desde locaciones remotas.

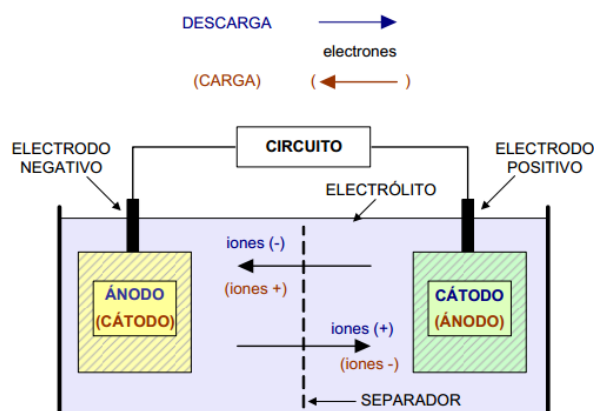
El uso de una fuente de energía dentro de la aplicación de la robótica móvil es imprescindible, ya que esta energiza los circuitos, motores para que el robot pueda realizar todas las actividades para la que fue programado, todo esto sin la necesidad de tener anclaje a la toma de corriente.

## 2.2. Baterías

La batería es un elemento fundamental del robot móvil, con esta se consigue alimentar cada uno de los dispositivos que integran el mismo. Como tal existen diversos tipos de baterías, que dependen tanto de su tamaño, costo y la capacidad de corriente que le es posible almacenar. (Viera Perez, 2003) Una batería también conocida como acumulador eléctrico se considera un dispositivo electroquímico capaz de almacenar energía en forma química mediante un proceso de carga, y liberarla como energía eléctrica durante otro proceso llamado descarga, a través de reacciones químicas reversibles cuando la batería es conectada con un circuito eléctrico de consumo externo (Burgos Mellado, 2013).

Su unidad básica es la celda, pudiendo estar una batería constituida por varias celdas conectadas en serie o en paralelo con el fin de conseguir la tensión y capacidad deseada. Como se observa en la Figura 2, la mayoría de las baterías son similares en su construcción y están formadas por (Viera Perez, 2003):

- Un número de celdas compuestas de electrodos positivos y negativos.
- Separadores dieléctricos.
- Electrolito.



**Figura 2.** Componentes internos de una batería.  
Fuente: (Viera Perez, 2003)

El tamaño, el diseño interno y los materiales utilizados para formar una batería controlan la cantidad de energía disponible en cada celda. El tipo de acumulador mayormente usado en la actualidad, dado sus prestaciones, es la batería de polímero de litio, ya que posee una resistencia interna baja, lo que permite aprovechar casi el 100% de la energía eléctrica disponible. (Burgos Mellado, 2013)

Actualmente existen dos grandes grupos de baterías que son:

- **Baterías Primarias:** Estas baterías no permiten un ciclo de recarga, ya que una vez que han sido descargadas acaba su vida útil. Por tanto, cuando una batería primaria agota su energía eléctrica debe ser sustituida. Generalmente su característica particular es su pequeño tamaño lo que su campo de aplicación se enmarca fundamentalmente dentro de las potencias bajas. (Viera Perez, 2003)
- **Baterías Secundarias:** Estas baterías permiten un número limitado de ciclos de carga y descarga, de ahí que también se les denomine como *baterías recargables* o *acumuladores*. Las baterías secundarias se caracterizan por comercializarse en un



amplio margen de capacidades, que van desde miliamperios-hora hasta llegar a varias decenas o centenas de amperios-hora. (Viera Perez, 2003)

### **2.2.1. Terminología y Definiciones:**

Para una mejor comprensión del presente trabajo es necesario hacer referencia a diferentes definiciones, parámetros e índices de comportamiento relacionados tanto con la propia estructura física de los elementos que componen una batería como con los procesos electroquímicos que se producen durante los ciclos de carga-descarga.

Desde el punto de vista funcional de la batería se tiene la siguiente terminología:

- **Electrolito:** El electrólito es un conductor iónico que permite la transferencia de electrones en el interior de la celda por medio del desplazamiento de iones entre el ánodo y el cátodo. (Mohamed Sayed, 2013)
- **Capacidad o Capacidad Nominal:** Es la cantidad de energía que es capaz de acumular y por consiguiente, de restituir. Se expresa en Amperios-horas y su símbolo es Ah. Un submúltiplo que se utiliza es el miliamperio-hora, símbolo mAh. (Bianchi, 2011)
- **Tensión:** Varía en función de su fabricación (celdas internas de carga), y se conoce como tensión nominal y representa la tensión media del acumulador en fase de descarga y en funcionamiento. Éste valor varía a lo largo del tiempo de utilización. Las variaciones de esta tensión son debidas en parte a la resistencia interna. (Viera Perez, 2003)

- Resistencia interna: Es una característica que no favorece a una batería, ya que provoca una caída de tensión en la batería cuando aumenta la corriente de consumo. La resistencia interna se debe, en parte, a las conexiones internas, a la inercia de la reacción química y a los elementos de protección que se sitúan en el interior de la batería. Su valor puede variar de algunas decenas a varias centenas de  $m\Omega$ , en función de las tecnologías de fabricación. (Samolyk & Sobczak, 2013)
- Voltaje de corte: Voltaje mínimo permisible en el que se sabe que la batería está "vacía". (Viera Perez, 2003)
- Estado de Carga (State of Charge - SOC): El parámetro estado de carga (SOC) muestra la capacidad actual de la batería como un porcentaje de la capacidad máxima. Como tal, proporciona una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada en una batería. El estado de carga es análogo a un medidor de combustible en un vehículo. Generalmente es un número adimensional entre 0 y 100 que representa un porcentaje. (Chiasson & Variamohan, 2006)
- Profundidad de descarga (Depth of Discharge - DOD): La profundidad de descarga es un término alternativo para indicar el estado de carga (SOC) de una batería. DOD representa el porcentaje de la capacidad de la batería que ya ha sido descargado. En otras palabras,  $DOD (\%) = 100 - SOC (\%)$ . (Chiasson & Variamohan, 2006)
- Estado de Salud (State of Health - SOH): El estado de salud indica una condición en la duración de la batería entre el comienzo de la vida (Beginning of Life - BoL) y fin de la vida (End of Life - EoL) en término de porcentaje. El BoL de una batería es definido como el instante en el tiempo cuando comienza la vida de la batería, mientras que el

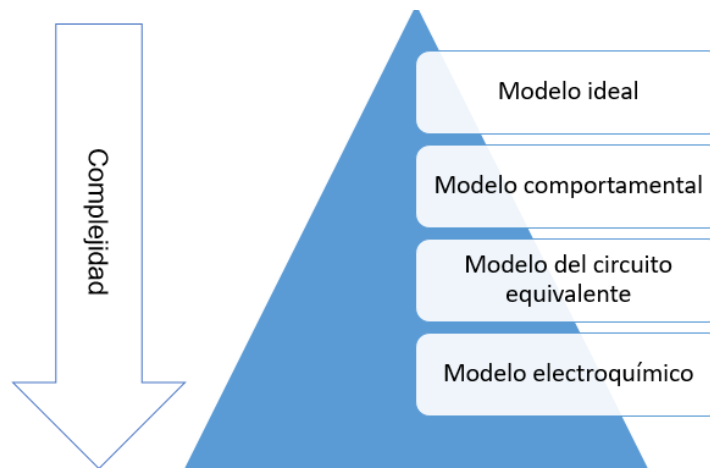
EoL de una batería se alcanza cuando la batería no puede funcionar de acuerdo a los requisitos mínimos predefinidos. (Samolyk & Sobczak, 2013)

- Índice C: Es la razón de carga o de descarga expresada en amperios y numéricamente proporcional a la capacidad nominal de la batería en amperios-hora. Con frecuencia se utilizan múltiplos y submúltiplos de este índice para definir la magnitud de la corriente de carga o de descarga de la batería. (Burgos Mellado, 2013)
- Auto-descarga: Pérdida de capacidad de una batería cuando se mantiene en circuito abierto. Generalmente, la auto descarga se expresa en términos de porcentaje de pérdida de capacidad con respecto a la capacidad nominal en un periodo de tiempo de un mes.
- Sobrecarga: Proceso que tiene lugar cuando se continúa la aplicación de carga a una batería después que se pierde la eficiencia de las reacciones electroquímicas. (Samolyk & Sobczak, 2013)
- Densidad de Energía: Energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen (Wh/l).
- Densidad de Potencia: Potencia que puede entregar una batería por unidad de volumen (W/l).
- Energía Específica: Energía que puede almacenar una batería por unidad de peso (Wh/kg). (Chiasson & Variamohan, 2006)
- Potencia Específica: Potencia que puede entregar una batería por unidad de peso (W/kg). (Chiasson & Variamohan, 2006)

- Vida útil: Tiempo que la batería puede mantenerse en servicio al no haberse degradado sus características hasta el punto de hacer decrecer sus prestaciones por debajo de unos límites predeterminados. En el caso de baterías recargables este tiempo está relacionado con el número de meses o años de funcionamiento de la batería (en el caso de baterías que funcionan en régimen estacionario) o bien con el número de ciclos de carga-descarga al que se haya sometido la batería (en el caso de baterías que funcionan bajo regímenes cíclicos de carga-descarga). (Burgos Mellado, 2013)

### **2.2.2. Modelamiento de la batería**

Las baterías o bancos de baterías son elementos eléctricos usados mayormente en aplicaciones que conlleven la necesidad de suministrar energía eléctrica de forma controlada. (Chiasson & Variamohan, 2006) Un problema muy importante surge debido a que las reacciones químicas internas, ya que su representación es compleja. (Chiasson & Vairamohan, 2004). De aquí la necesidad de un modelo que caracterice las baterías eléctricas, de esta manera se contribuye a mejorar el desempeño tanto a corto y largo plazo, bajo diferentes condiciones de operación. (González-Longatt, 2006). Un modelamiento adecuado es necesario para los sistemas de administración de la batería. La elección entre estos modelos es una compensación entre la complejidad del modelo, la precisión y el esfuerzo de parametrización. Los modelos se pueden clasificar en cuatro categorías, desde el más abstracto hasta el más detallado, como se muestra en la Figura 3 (Chang, 2013).



**Figura 3.** Pirámide de niveles de categorización para el modelamiento de una batería.  
Fuente: (Chang, 2013)

#### **2.2.2.1. Modelo Ideal**

El modelamiento ideal de una batería, explica que la misma se representa como una fuente de voltaje ideal con energía ilimitada. Este modelo se utiliza solo si no es de interés el análisis del dispositivo de almacenamiento de energía (batería). (Chang, 2013)

#### **2.2.2.2. Modelo Comportamental**

Los modelos comportamentales o de caja negra simulan el comportamiento de la tensión en las terminales de la batería, en la que se desprecia el comportamiento físico o electroquímico subyacente. Dicho de otra manera, este proceso permite realizar un modelamiento, con la que se evitaría la evaluación de la dinámica de la batería. Su desarrollo principalmente consiste en analizar la respuesta que se obtiene frente a determinadas condiciones de trabajo, y en base a esta información, generar un modelo que tiene la capacidad de adaptarse a variaciones y de aprender en base a la experiencia. (Sobczack & Samoyalyk, 2013) Dentro de los modelos comportamentales, se hacen uso

de métodos tales como redes neuronales y lógica difusa. Generalmente los métodos comportamentales usan como variables del sistema:

- Corriente entrante o saliente de la batería.
- Voltaje en las terminales de la batería.
- La temperatura de la batería

Usualmente se obtiene como salida, valores que corresponderían a la tensión de descarga o a su vez el estado de carga de las baterías. Aunque los modelos comportamentales ofrecen una buena relación de precisión frente a complejidad, poseen tres carencias en su uso:

- Los datos obtenidos del sistema son sumamente importantes, debido a que su formulación se la realiza en base a la muestra obtenida.
- No se basa estrictamente en una formulación matemática.
- Debido a que se ocupa lógica difusa y redes neuronales, requiere una fuente de información extensa para entrenar previamente al sistema.

### **2.2.2.3. Modelo del Circuito Equivalente**

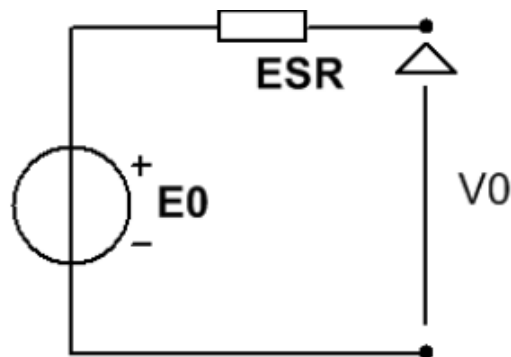
Los componentes del circuito equivalente de elementos combinados, como resistencias y condensadores, se pueden usar para representar el comportamiento de una celda de batería. Este método se aplica ampliamente debido a su simplicidad, bajo número de parámetros para ajustar y fácil implementación. (Chiasson & Variamohan, 2006) Comúnmente puede ser un circuito RC de primer, segundo o de tercer orden. Los parámetros del modelo, como las resistencias y las capacitancias, se calculan mediante

la identificación del sistema utilizando datos de prueba. Los actuales sistemas de gestión de batería (BMS) se basan principalmente en modelos de circuitos equivalentes debido a su solidez y efectividad, ya que estos modelos permiten implementación de aplicaciones en tiempo real. (Xiao, Shi, & He, 2010)

Sin embargo, existen limitaciones para proporcionar información sobre las reacciones electroquímicas que ocurren internamente dentro de la celda de energía. Estas limitaciones no hacen posible la capacidad de predecir fenómenos electroquímicos como la degradación celular, el desvanecimiento de la capacidad de carga y el desvanecimiento de la potencia eléctrica. Para obtener mejores resultado se suele combinar con modelos térmicos para predecir el comportamiento general de la batería eléctrica.

Los métodos de circuito equivalente más comúnmente usados en la práctica son:

Modelo de batería simple: Un modelo de batería simple consiste solo en elementos pasivos lineales, creados mediante el uso de una batería ideal de voltaje de circuito abierto y resistencia interna constante como se muestra en la Figura 4. (Sobczack & Samoyalyk, 2013)



**Figura 4.** Modelo de batería simple  
Fuente: (Sobczack & Samoyalyk, 2013)

Donde:

- $E_0$ : Voltaje de circuito abierto
- $ESR$ : Resistencia interna
- $V_0$ : Voltaje de terminales en la batería

El modelo de batería simple se usa principalmente en sistemas donde la batería no tiene una influencia demasiado alta en el circuito. Es incapaz de describir el comportamiento de la batería debido a la falta de relación de resistencia interna en diferentes estados de carga (SOC). (Samolyk & Sobczak, 2013)

Modelo avanzado de batería simple: El modelo avanzado de batería simple es una versión mejorada del modelo de batería simple mediante la adición de la dependencia de la resistencia interna en el SOC. La configuración de este modelo es la misma que el modelo de batería simple, presentado en la figura 4. La relación entre la resistencia interna y el SOC está representada por la ecuación:

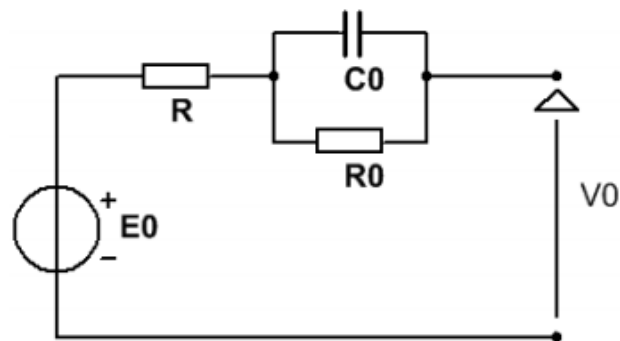
$$ESR = \frac{R_0}{SOC^k}$$

Donde:

- $R_0$ : Resistencia cuando la batería está completamente cargada
- SOC: Estado de carga.
- $k$ : Coeficiente de capacidad de la batería.



Modelo de batería de Thevenin: El modelo de batería de Thevenin es otro modelo de uso común, inicialmente propuesto para tener en cuenta el comportamiento transitorio de la batería. (Sobczack & Samoyalyk, 2013) El modelo de Thevenin se muestra en la figura a continuación:



**Figura 5.** Modelo de batería de Thevenin  
Fuente: (Samolyk & Sobczak, 2013)

Donde:

- $R_0$ : Resistencia entre los electrodos y el electrolito.
- $R$ : Resistencia interna.
- $C_0$ : Capacitancia.
- $E_0$ : Tensión ideal de la batería.

El parámetro  $R_0$  representa la resistencia entre las placas de contacto y el electrolito, mientras que el  $C_0$  se refiere capacidad de almacenamiento de carga entre las placas paralelas (Sobczack & Samoyalyk, 2013). La gran desventaja del modelo de Thevenin es que se asume a primera instancia el valor de todos los elementos, ya que cada uno depende del SOC y así como de otras características de la batería.

### 2.3. Estado de Carga de Baterías

El estado de carga o SOC es uno de los parámetros más importantes para representar baterías. En general, el SOC de una batería se define como la relación de su capacidad actual  $Q(t)$  a la capacidad nominal ( $Q_n$ ). (Chang, 2013) La capacidad nominal es un valor ofrecido por el fabricante y representa la cantidad máxima de carga que se puede almacenar en la batería. El estado de carga se lo puede definir de la siguiente manera (Watrin, Blunier, & Miraonui, 2012):

$$SoC = \frac{Q(t)}{Q_n}$$

Los diversos métodos matemáticos de estimación se clasifican según la metodología, por consiguiente conviene dividirlos en 4 grupos (Chang, 2013):

- Medición directa.
- Estimación tradicional.
- Sistemas adaptativos.
- Otros métodos.

#### 2.3.1. Medición directa

El método de medición directa usa propiedades físicas de la batería, como la tensión en los bornes y la impedancia de la batería. Los métodos de medición directa más conocidos son:

Método de voltaje en circuito abierto: Este método puede ser aplicado a todas las tecnologías de baterías, y establece que existe una relación entre la tensión de circuito abierto (OCV) y el estado de carga de la batería. Para aplicarlo, solo basta con mapear la curva SOC vs OCV. Este método principalmente se utiliza bajo la condición en la que el acumulador fue sometido a considerables periodos de inactividad. (Samolyk & Sobczak, 2013)

Método de la resistencia interna: Las baterías poseen elementos intrínsecos, uno de estos es la resistencia interna, la cual está compuesta de dos resistencias adicionales, la primera de ellas corresponde a una resistencia óhmica, la cual está relacionada con algunas características de la batería tales como estado de carga (SOC), estado de salud (SOH). (Samolyk & Sobczak, 2013) La segunda resistencia, hace referencia a una llamada “resistencia de polarización”, que responde a las características químicas a las que fue sometido el electrolítico

Método de la impedancia espectroscópica: Este método se basa en el comportamiento de la impedancia de la batería, al relacionar algunas características que definen a una batería como son estado de carga (SOC), estado de salud (SOH), ciclos de vida, temperatura entre otros. Este método hace uso de una técnica conocida como *espectroscopia de impedancia electroquímica* (EIS), el cual define el espectro de impedancia del sistema. (Lawson, 2018) La desventaja principal de este método es que las curvas de impedancia dependen de la temperatura que se obtiene mientras se realiza la experimentación, para cual este método únicamente sería recomendable si se tienen

las mismas condiciones de temperatura. Debido a esta razón este método no se lo implementa. (Xiao, Shi, & He, 2010)

### 2.3.2. Estimación tradicional

El método de estimación tradicional usa principalmente la corriente de descarga de la batería como entrada e integra la descarga actual en un periodo de tiempo para calcular el estado de carga (SOC). (Xiao, Shi, & He, 2010) Los métodos de estimación tradicional más conocidos son:

Contador de Amperios Hora de Coulomb: El contador de amperios hora de coulomb es un método que consiste en obtener mediante sensores, la corriente que entra o sale de la batería, para posteriormente integrarla de manera que se pueda estimar la capacidad restante de la batería. (Zabaleta, San Martin, & Pascual, 2016) Como tal el estado de carga se determina mediante la siguiente ecuación

$$SOC = SOC(t-1) - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t I dt$$

Donde

- $C_N$  corresponde a la capacidad nominal de la batería.
- $I$  corresponde a la corriente que entra / sale de la batería.

Generalmente a este método se le realiza una variación, multiplicando a la integral un factor de eficiencia coulombica ( $\mu_i$ ), que representa una relación entre la capacidad de descarga y capacidad de carga, lo que lleva a la siguiente representación:

$$SoC = SoC_0 - \frac{\mu_i}{C_N} \int_{t_0}^t I dt$$

Donde

- $\mu_i = 1$  para condición de carga de batería.
- $\mu_i < 1$  para condición de descarga de batería.

La principal ventaja para este método es que puede ser aplicado cuando la batería se encuentra en funcionamiento, además de que es sencillo de implementar. (Watrin, Blunier, & Miraonui, 2012) La influencia de los errores en las mediciones de corriente puede ser disminuida combinándolo con el método del voltaje en circuito abierto.

### 2.3.3. Sistemas adaptativos

Los sistemas adaptativos son métodos también conocido como auto-diseñadores ya que pueden ajustar automáticamente el valor del estado de carga para diferentes condiciones de descarga. (Xiao, Shi, & He, 2010) Los sistemas adaptativos más conocidos son:

Filtro de Kalman: Este filtro fue desarrollado durante década de los 60 por Rudolf Kalman, su principal objetivo es determinar el estado no medible de un sistema lineal a partir de mediciones de entradas y salidas reales, haciendo uso de variables de estado que representen la dinámica del sistema. (Watrin, Blunier, & Miraonui, 2012). Básicamente este método consiste en que a partir de un modelamiento ya existente de la batería, hace uso de ecuaciones de estado que contengan como variable el estado de

carga. Principalmente este método ofrece la ventaja de ser un estimador eficiente, con la característica de poder aplicarlo en tiempo real en todas las tecnologías de baterías existentes. (Chang, 2013). Su principal desventaja se debe al alto costo computacional cuando se ofrece un modelamiento complejo. (Viera Perez, 2003)

**Redes Neuronales:** El método de redes neuronales, la batería puede ser modelada a través de una red neuronal, donde las entradas de las neuronas pueden ser valores de voltajes, corrientes y temperaturas, y la salida el voltaje en los electrodos de la batería o a su vez el mismo estado de carga. (Viera Perez, 2003) Debido a su formulación las redes neuronales aprenden y se adaptan a los cambios que sufre el sistema, de hecho la principal ventaja de las redes neuronales radica en que no necesita estrictamente un modelamiento de la batería, debido a que la red neuronal aprende del entrenamiento según se efectúe a experimentación. (Watrin, Blunier, & Miraonui, 2012) Como toda red neuronal su desventaja principal, es la necesidad de realizar previamente varios experimentos de tal manera que la red entre en entrenamiento. Como tal las redes neuronales se usan de dos formas:

- Determinando el estado de carga de las baterías directamente desde la red neuronal.
- Combinando este método con uno que implique la formulación de sistemas adaptivos como el filtro de Kalman.

#### **2.4. Sistemas embebidos**

Los sistemas embebidos se entienden como una combinación de hardware y software de computadora, sumado tal vez a algunas piezas mecánicas o de otro tipo, diseñado

para tener una función específica. Es común el uso de estos dispositivos que cuentan con un procesador y un programa ejecutándose que les permite funcionar. (Ramirez Rivera & Reyes Perez, 2015) Las principales características de este sistema es el bajo costo y consumo de potencia eléctrica. Dado que muchos sistemas embebidos son concebidos para ser producidos en centenares de unidades, el costo por unidad es un aspecto importante a tener en cuenta en la etapa de diseño. Generalmente, la mayoría sistemas embebidos emplean procesadores muy sencillos, con pocas prestaciones y memorias pequeñas para minimizar los costos.

#### **2.4.1. Sistemas operativos en tiempo real**

Los sistemas operativos están diseñados para ejecutar múltiples aplicaciones y dar la ilusión al usuario de que todas las acciones se ejecutan simultáneamente, donde la variable tiempo es un factor muy importante y determinante. (Barry , 2016) La característica fundamental de los sistemas operativos en tiempo real es que responde a fuertes restricciones de tiempo en muchos casos, por lo tanto, un sistema se dice que trabaja en tiempo real si la información después de la adquisición y tratamiento es todavía vigente. (Butazzo , 2011) Un sistema embebido puede o no ser de tiempo real ya que depende de los requerimientos específicos de la aplicación que se está llevando a cabo. El término tiempo real, no solo significa que un sistema pueda responder de forma muy rápida, sino que se pueda reaccionar con precisión cuando una sección del programa se esté en ejecución. (Ramirez Rivera & Reyes Perez, 2015)

Para que un sistema sea llamado en tiempo real debe cumplirse lo siguiente:

- Los sistemas operativos en tiempo real poseen la característica de realizar casi simultáneamente una instrucción y una ejecución de orden.
- Responde a estímulos dentro de un plazo de tiempo determinado.
- El sistema operativo o a su vez el lenguaje de programación proporcionará el soporte para que las tareas se ejecuten de forma concurrente (ejecución paralela, a través de multitarea).

Para que el funcionamiento del sistema sea correcto no basta con que las acciones se cumplan, sino que deben llevarse a cabo dentro de un intervalo de tiempo especificado. (Barry , 2016)

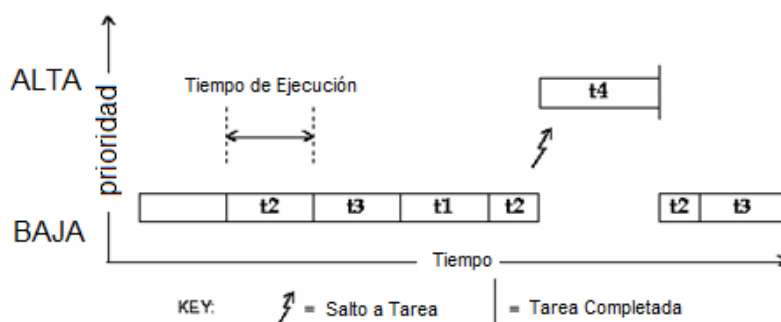
La característica principal de un sistema operativo en tiempo real es la multitarea, que básicamente es compartir el tiempo de acceso al procesador entre todas las tareas con el fin de dar la ilusión al usuario que los procesos se realizan simultáneamente. Existen diferentes maneras de compartir el acceso temporal al procesador, a continuación se explicará los siguientes métodos:

Multitarea cooperativa: La multitarea cooperativa es el algoritmo más sencillo. Este tipo de multitarea utiliza un recurso inherente al sistema operativo llamado planificador (Scheduler), en sí un planificador es aquello que lleva a cabo la actividad de programación, a menudo los planificadores se implementan para que mantengan distribuidos todos los recursos de la computadora, también permiten que múltiples



usuarios compartan recursos del sistema de manera efectiva o para lograr una calidad de servicio objetivo.

La multitarea cooperativa da por finalizado su acceso al procesador con cada tarea ejecutándose, es decir cada tarea cede un “token” para permitir que otras tareas puedan procesarse. Cada evento coopera entre sí para compartir el tiempo de acceso al procesador. Aquí existe cierta excepción, y es que si una tarea entra en un bucle infinito no renuncia a su tiempo de acceso al procesador, el sistema será bloqueado por el planificador. En la figura a continuación, se ve claramente un caso de tarea cooperativa donde la tarea A tiene acceso al procesador, mientras que las tareas B y C están en proceso de espera hasta la tarea A esté terminada. (Barry , 2016)

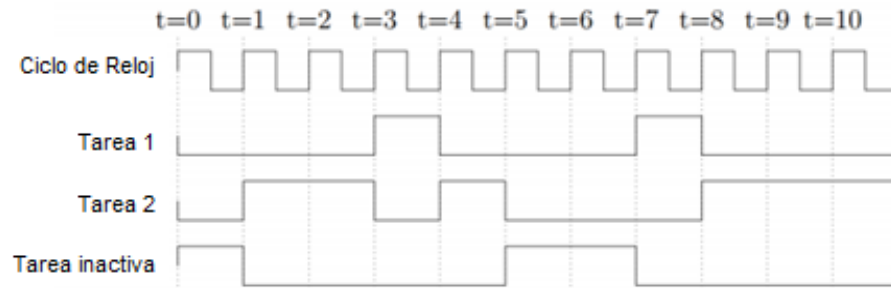


**Figura 6.** Multitarea cooperativa

Fuente: (Barry , Mastering the FreeRTOS, 2016)

Multitarea preferencial: Un sistema de multitarea preferencial, se diferencia principalmente de una multitarea cooperativa, ya que no usa el pase de un “token” de tarea a tarea para permitir el acceso al procesador. El sistema operativo tiene un planificador igualmente, cuya función es dar acceso al procesador en función de la tarea de mayor prioridad. El planificador en la multitarea preferencial se caracteriza por estar dirigido por interrupciones de temporización. En cada marca de temporización, se

comprueba si existe alguna tarea con una prioridad más alta, si es así, se pospondrán todas las demás tareas hasta que finalice la tarea de más alta prioridad.



**Figura 7.** Multitarea preferencial

Fuente: (Barry , Mastering the FreeRTOS, 2016)

En la figura 7 se puede observar tres tipos de tareas preferenciales:

- La Tarea 1 tiene un nivel de prioridad 1, esta se lanza cada 3 ciclos de reloj y ejecuta su rutina en un ciclo. La cual se repetirá sucesivamente.
- La tarea 2, tiene un nivel de prioridad 2, se pone en marcha cada 4 ciclos de reloj, su duración es de 2 ciclos y necesita 1 ciclo adicional para completar su trabajo.
- La tarea inactiva tiene un nivel de prioridad 0, es decir siempre está presente en los sistemas de tiempo real, y únicamente se ejecutará cuando no hay otras tareas que realizar.

La prioridad de la multitarea preferencial permite un cierto nivel de abstracción en comparación con la multitarea cooperativa, ya que lo único que el programador tiene que hacer es otorgar una prioridad correcta para cada tarea, para que el programa funcione correctamente. De hecho la mayoría de sistemas operativos trabajan bajo este formato.

(Butazzo , 2011)

## CAPITULO 3

### ALGORITMO DE MEDICIÓN DE ESTADO DE CARGA

En este capítulo se realiza un análisis al método de conteo de Coulomb para la medición de estado de carga de las baterías LiPo, para su posterior diseño e implementación dentro del microcontrolador Arduino DUE de 32 bits con el sensor de corriente Acs-712 5A usando programación en paralelo mediante sistemas operativos en tiempo real.

#### 3.1. Análisis del método de Coulomb

##### 3.1.1. Desarrollo del modelo matemático basado en el conteo de Coulomb.

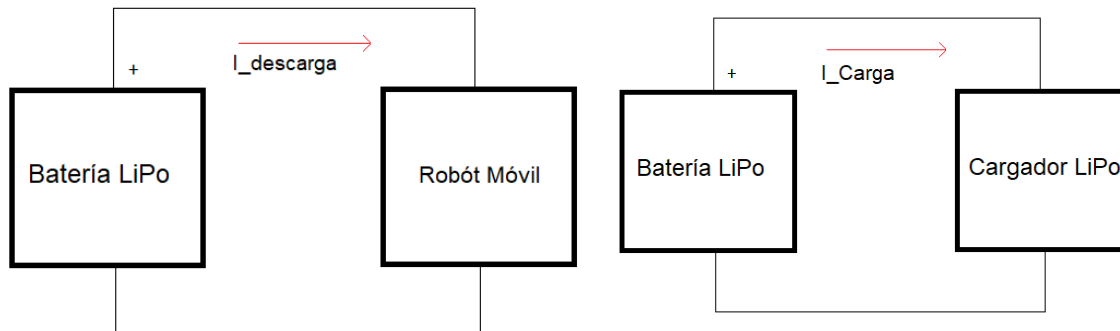
En términos generales el estado de carga de una batería se describe como un valor adimensional que representa un número en forma de porcentaje 0% al 100%, de cuanta energía eléctrica almacenado le resta a una batería. Análogamente el estado de carga representaría a un medidor de combustible en un vehículo. De la manera más sencilla se muestra al SOC a través de la relación entre la capacidad de carga en una celda ( $Q_{release}$ ) y la capacidad en carga completa ( $Q_{max}$ ):

$$SoC = \frac{Q_{release}}{Q_{max}} * 100\% \quad (1)$$

Como se expuso en el capítulo 2, existen muchos métodos para determinar una aproximación del estado de carga de una batería, el método que se va a desarrollar dentro del presente capítulo es el contador de amperios hora de Coulomb.

El contador de amperios hora de Coulomb es un método de aproximación que se considera de medición directa tradicional, ya que para establecer un valor de SOC se

necesita saber el valor de la corriente de carga (proveniente del cargador de baterías) y la corriente de descarga (corriente que fluye al robot móvil), como se puede ver en la siguiente imagen:



**Figura 8.** Corriente de carga hacia el robot móvil y corriente de descarga

El contador de amperios hora de coulomb realiza su cálculo, a través de la integral de la corriente adquirida a través de la medición directa en un determinado intervalo de tiempo, como resultado se tendría la ecuación a continuación:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) - \frac{\int_0^t \mu * i * dt}{Q_{max}} * 100\% \quad (2)$$

Para lograr que dicha ecuación se cumpla se deberá determinar los siguientes parámetros de manera inicial:

- SOC (t-1): valor anterior del estado de carga.
- $\mu$ : coeficiente de eficiencia coulombica que indica la vida útil del ciclo de la batería, generalmente se encuentra entre valores de 0,9 a 1. Se obtiene mediante la división entre capacidad de descarga y capacidad de carga de la batería.

- $Q_{max}$ : Carga nominal de la batería.
- $i$ : Corriente presente en el circuito.
- Además es necesario, resaltar que para que se cumpla la Ecuación (2), se debe cumplir un requisito indispensable, y es que el tiempo de integración sea igual al tiempo de muestreo del experimento.

El contador de amperios hora es un método ampliamente utilizado, debido a que ofrece poca cantidad de errores y una adaptabilidad para toda clase de baterías cuando se requiera una estimación del estado de carga. Cabe recordar que Amperio-hora es la unidad de carga eléctrica y se abrevia como [Ah], este valor indica la cantidad de carga eléctrica que provee una batería. Para poder determinar la cantidad de carga eléctrica que suministra una batería se debe realizar una medición directa de la corriente suministrada, lo que para conseguir dicho valor es necesario colocar un sensor de corriente directamente en la salida de la batería. Con el presente método se logra obtener el valor de la corriente suministrada por la batería.

### **3.2. Aplicación del método de conteo de Coulomb.**

Una parte fundamental del proyecto es establecer el estado de carga de las baterías presentes en la plataforma robótica, para conseguir dicha tarea se debe contar con los siguientes elementos:

- Baterías recargables, para conseguir una fuente de energía eléctrica.
- Sensor de corriente, elemento necesario para establecer el estado de carga por el método de conteo de amperios hora.

- Microcontrolador, elemento que permite establecer un algoritmo de medición de estado de carga en base al sensado de corriente.

Una vez enumerados los elementos necesarios para la implementación se procede a seleccionar las características de cada elemento:

Baterías recargables: Para llevar a cabo el proyecto, se ha decidido escoger baterías de polímero de litio. Este tipo de baterías presentan características ventajosas como son:

- Alta densidad de descarga.
- Menor volumen en comparación a otra tecnología de baterías.
- Posee una resistencia interna pequeña, lo que permite aprovechar el 100% de su energía.

Sensor de corriente: El método de conteo de amperios hora se lo conoce como de medición directa, es decir sus cálculos se realizan en base a la medición de una variable, en este caso la variable medida es la corriente de la batería que es entregada al circuito. Para medir la corriente que entrega la batería se puede usar 3 diferentes métodos: (Bayo, 2014)

Resistor de shunt: Se basa en medir la corriente a través de una caída de voltaje con una resistencia de valor óhmico bajo de alta precisión entre la batería y la carga conocida. Este método de medición de corriente causa una pequeña pérdida de potencia, además puede sobrecalentar la batería y es inexacta para corrientes bajas.

Magnetoresistencias:

Los sensores magnetorresistivos son costosos, sin embargo presentan una mayor

sensibilidad con un nivel de señal más alto. Se caracterizan por poseer una mejor estabilidad a altas temperaturas que los dispositivos de efecto Hall.

**Sensor de efecto Hall:** Los sensores de efecto Hall proveen una solución económica y precisa para medir corriente en AC o DC, ya sea en ambientes industriales o comerciales. Su funcionamiento se basa en transformar un campo magnético provocado por el paso de corriente a través de un alambre.

El sensor de corriente que se ha escogido es el ACS712 que es un sensor de corriente por efecto hall, ya que las prestaciones que se obtienen las hace una excelente opción frente a los demás sensores, el sensor ACS712 presenta: (Allegro, 2014)

- Sensor lineal de efecto hall de bajo offset (Voltaje de desfase con respecto a referencia).
- Medición de alta precisión.
- Baja resistencia con baja disipación de potencia (1.2 mΩ típico).
- Soporta picos de corriente de hasta 5 veces la corriente nominal.
- Las terminales se encuentran aisladas eléctricamente, lo que evita la necesidad de aislamiento externo.

**Microcontrolador:** El microcontrolador que se escogió para llevar a cabo el algoritmo de medición de estado de carga es CortexM3 ARM de 32 bits perteneciente a la tarjeta de desarrollo Arduino DUE, con las siguientes características:

- Tecnología Atmel ARM de 32 bits.
- Velocidad de procesamiento de 84 Mhz.

- Memoria Flash de 512 KB y Sram de 96 Kb.

Dichas características lo hacen apropiado para las condiciones del presente proyecto en cuanto a procesamiento y memoria. Una vez hecha la selección de los elementos necesarios para establecer el cálculo el estado de carga, se enumeran en la Tabla 1 con sus respectivas características:

**Tabla 1**

*Características de elementos para determinar el estado de carga.*

<b>Elemento</b>	<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Función</b>
<b>Baterías Li-Po</b>	7,4 Vdc @3000mAh	3	Fuente de energía eléctrica
<b>Sensor Acs-712</b>	Sensor efecto Hall 10A	1	Sensor para medir la variable corriente.
<b>Microcontrolador</b>	Arduino Due	1	Tarjeta encargada de determinar el estado de carga

### 3.2.1. Implementación del algoritmo en sistemas embebidos

La implementación del algoritmo de estado de carga en sistemas embebidos conlleva establecer inicialmente algunos parámetros que están inmersos en la ecuación de cálculo de estado de carga.

De acuerdo a la ecuación (2), el estado de carga estará representado:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) - \frac{\int_0^t \mu * i * dt}{Q_{max}} * 100\%$$

A continuación se explicarán cada uno de los parámetros a usar en la implementación en sistemas embebidos:



- SOC (t-1): Representa la carga de la batería en un instante anterior, por lo tanto este valor se cargará automáticamente con un dato previamente calculado con el algoritmo de estado de carga en la memoria no volátil del microcontrolador.
- $\mu$  (*coeficiente de eficiencia coulombica*): De acuerdo a Buchman (2017), pruebas realizadas con baterías de polímero de litio, demostraron que el valor de la eficiencia coulombica es de aproximadamente 99.5 %, con un máximo de 99.9% incluso cuando se somete a más de 30 ciclos de carga. Por lo tanto para el presente trabajo de investigación se usará un  $\mu = 0.999$ , debido a que la capacidad de recuperación tiende a ser similar a la capacidad nominal de la batería.
- $Q_{max}$ : Debido a que se utilizan 3 baterías Li-Po cada una de 3000 mAh, se obtiene un banco de baterías de 9000 mAh, por lo tanto el valor de  $Q_{max} = 9000 \text{ mAh}$
- $i$ : El valor de corriente se obtiene a través del sensor de corriente Acs – 712, hacia la plataforma Arduino DUE.

Por lo tanto la ecuación de cálculo de estado de carga a ser implementada es la siguiente:

$$SoC(t) = SoC(t - 1) - \frac{0.999 * \int_0^t i * dt}{9000} * 100\% \quad (3)$$

Acondicionamiento de valores para sensado de corriente (Allegro, 2014), El sensor de corriente Acs – 712 posee las siguientes características técnicas:

- Voltaje de polarización: 5 Vdc.
- Corriente de activación: 3 mA
- Sensibilidad: 185 mA / V.
- Rango de medición: 0 a  $\pm 5 \text{ A}$

El sensor Acs – 712 por efecto Hall posee un offset de tensión, debido a que fue diseñado para medir corriente de manera bidireccional, en el que se obtiene un valor referencial de 0 A proporcional a 2,5 Vdc. Debido a esto es esencial realizar una ecuación que elimine el desfase de tensión en razón de tener una referencia válida para realizar futuros cálculos, además de realizar el acondicionamiento del valor del conversor análogo digital a valores de tensión entre 0 a 5 V, por lo tanto las siguientes ecuaciones son:

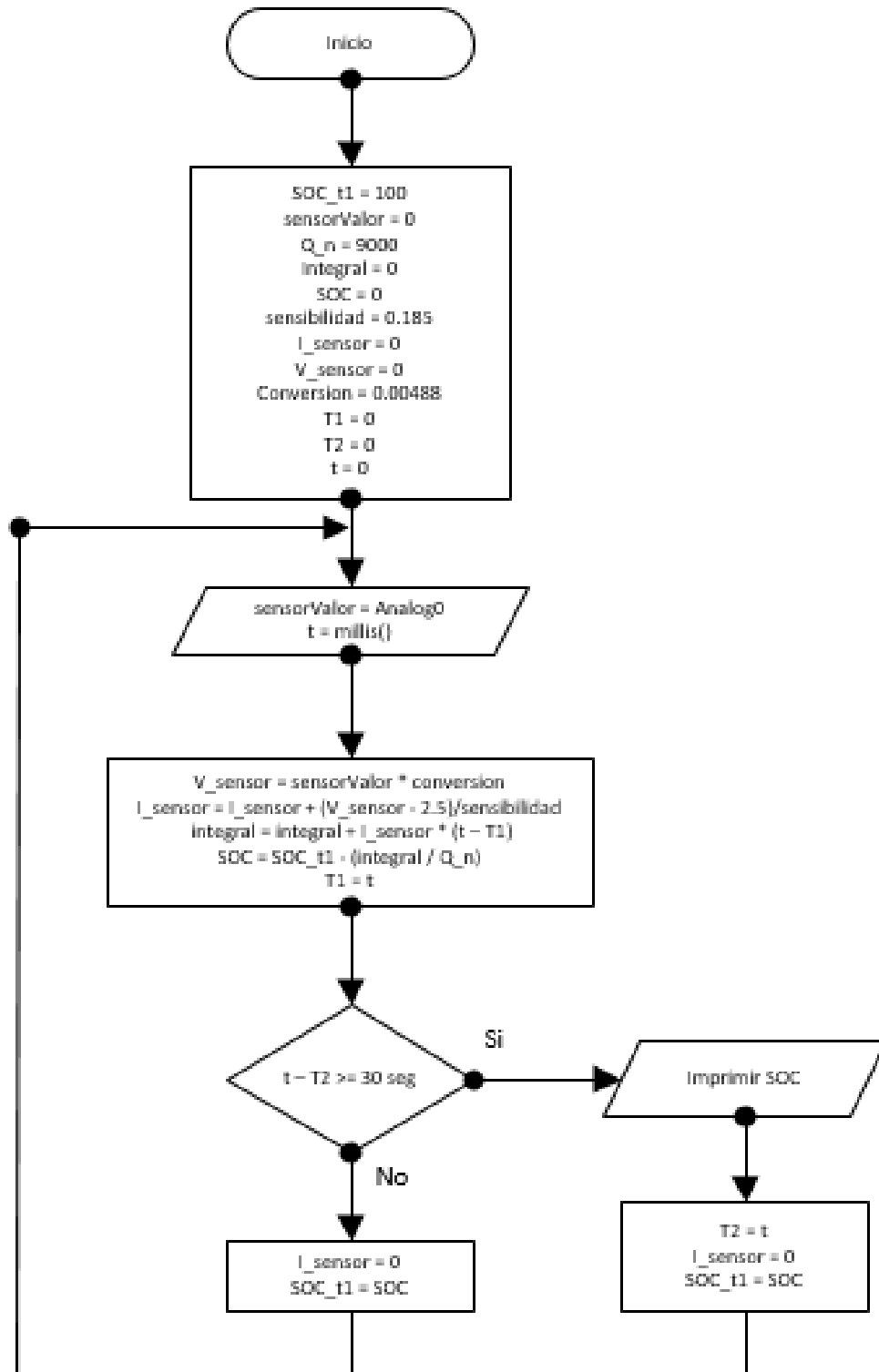
$$V_{0-5V} = \frac{V_{adc}}{1024} * 5 [Vdc] \quad (4)$$

$$I = \frac{V_{0-5V} - 2.5}{0.185} [A] \quad (5)$$

### 3.3. Diagrama de Flujo de la medición del estado de carga:

Para realizar la medición del estado de carga de baterías, se ha desarrollado un algoritmo que se divide en 5 fases, que son:

- Inicialización de variables a trabajar.
- Lectura de sensor de corriente y establecimiento de tiempo inicial.
- Procesamiento de ecuaciones que relacionan el estado de carga con variables de corriente y voltaje.
- Condición de decisión establecida por un intervalo de 30 segundos.
- Reiniciar la variable corriente para comenzar el bucle nuevamente.



**Figura 9.** Diagrama de flujo para medir el estado de carga de baterías LiPo con capacidad de 9000 mAh

**Tabla 2***Tabla de asignación de datos.*

<b>Datos</b>	<b>Tipo</b>	<b>Rango de valores</b>	<b>Descripción</b>
<b>SOC_0</b>	Entero	0 a 100	Valor almacenado en la memoria no volátil usada para la ecuación de estado de carga.
<b>sensorValor</b>	Flotante	0 a 1024	Valor que almacena la medición del sensor Acs-712.
<b>Q_n</b>	Entero	9000	Capacidad nominal de las baterías.
<b>Integral</b>	Entero		Valor usado para calcular el estado de carga.
<b>SOC</b>	Flotante	0 a 100	Valor que almacena el porcentaje del estado de carga.
<b>Sensibilidad</b>	Flotante	0.185	Valor intrínseco del sensor Acs-712.

**CONTINÚA** 

<b>I_Sensor</b>	Flotante	-5 a 5	Variable que almacena la corriente instantánea medida del sensor Acs-712.
<b>V_sensor</b>	Flotante	0 a 5	Variable de conversión para acondicionar la señal
<b>Conversión</b>	Flotante	0.00488	Valor usado para acondicionamiento de señal obtenida del sensor Acs - 712
<b>T1</b>	Entero	N/A	Tiempo de integración final
<b>T2</b>	Entero	N/A	Tiempo referencial.
<b>t</b>	Entero	N/A	Tiempo de integración inicial.

El algoritmo comienza su ejecución el mismo instante que el robot entra en funcionamiento. Como primer paso se requiere inicializar algunas variables como son: estado de carga, corriente, voltaje, así como algunas constantes que servirán durante el desarrollo de las ecuaciones que definen como tal el cálculo del nivel de carga eléctrica restante en las baterías. Seguido a esto como segundo paso, se ejecuta el desarrollo de

las ecuaciones como tal que rigen el estado de carga, inicialmente con la adquisición de datos por parte del sensor de corriente, se obtiene una señal de voltaje proporcional al valor de corriente, definido por la sensibilidad que ofrece el sensor Acs – 712. Obtenido el valor de tensión, la plataforma Arduino Due con su módulo embebido de conversión análogo a digital es la encargada de tomar la medición y convertirlo en valores con los que se pueda trabajar computacionalmente almacenándolo en la variable de tipo flotante sensorValor. Posteriormente esta variable se acondiciona a valores comprendidos entre 0 y 5, que representa el valor de tensión real antes de ser procesado por el módulo de conversión análogo digital de la plataforma Arduino Due. El sensor Acs-712 a pesar de medir corriente, su salida responde a valores de voltaje proporcionales a la intensidad de corriente con la que interactúa en ese instante. (Allegro, 2014) Como se explicó anteriormente el sensor Acs-712 es de característica bidireccional, lo que permite medir corriente en ambos sentidos, por lo tanto se debe dar un valor referencial como punto de partida para calcular el valor real de intensidad de corriente. La variable I\_sensor es la encargada de entregar la medición del sensor en términos de corriente eléctrica. Seguido se implementa la ecuación de estado de carga en dos partes, en la primera se realiza el proceso de integración en función del tiempo a través de la función millis, encargada de almacenar en la variable t, el intervalo de tiempo en la que se llevará a cabo el proceso matemático para finalmente completar la ecuación de estado de carga con la variable SOC. La siguiente fase dentro del algoritmo realiza una visualización del valor de estado de carga cada 30 segundos en el monitor serial de la plataforma Arduino Due, por último para completar la ejecución del algoritmo se reinicia la variable I\_sensor de tal manera que la medición de corriente sea la adecuada en cada ciclo.

## CAPITULO 4

### DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA LA PLATAFORMA DAGU WILD THUMPER

En este capítulo se realiza el diseño de la estrategia de control para la plataforma Dagu, además de presentar la propuesta de los módulos que conformarán la nueva estructura interna del robot. Se presenta también su distribución esquemática y forma de montaje de cada elemento en la plataforma Dagu Wild Thumper.

#### **4.1. Acondicionamiento del dispositivo de medición en el robot móvil.**

El robot móvil Dagu en los proyectos previos de Armijos (2017) en conjunto con Venegas y Alejandro (2017) presentan un conjunto de características que se deben cumplir:

- Carga promedio de 3Kg: El peso total del robot Dagu, se calculó de manera que involucre todos los elementos de sensado, acondicionamiento, control y ejecución, dando como resultado un peso aproximado de 2.5Kg.
- Facilidad de montaje: La estructura modular implementada en el proyecto, permite la fácil instalación de hardware, de acuerdo a las necesidades que se requiera utilizar.
- Movilidad todoterreno: El dispositivo móvil podrá ser usado en un terreno donde las condiciones no sean precisamente regulares.
- Operación continua: El funcionamiento del robot posee una autonomía inicial de 2 horas con 20 minutos, esta cifra corresponde al uso de 7 canes, considerando que cada uno únicamente puede trabajar 20 minutos (Policía Nacional, 2011) , con la

aplicación de la estrategia de gestión energética se obtiene una duración total de 3 horas con 40 minutos, que equivaldrían a un número aproximado de 11 canes adiestrados en detección de sustancias.

En el presente proyecto además de lo anteriormente mencionado, se añaden las siguientes propiedades:

- Estructura Modular: Todos los elementos que formen parte del robot deberán estar distribuidos de acuerdo a su función, agrupados en forma de módulos.
- Monitoreo de baterías: Ejecutar un algoritmo de control que permita realiza la gestión de los elementos en función del estado de carga de las baterías.

Cumpliendo con cada una de las características se establecen los elementos que estarán presentes en el robot Dagu, como se observa en la Tabla 3:

**Tabla 3**

*Elementos que conforman el robot de sensado químico Dagu Wild Thumper.*

<b>N°</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>MODELO</b>
1	Arduino Due	1	AT91SAM3X8E
2	Cable Usb	1	Cable Usb tipo A - B
3	Driver Motor DC	1	Motor 6 - 30 Vdc @ 3 A
4	Módulo de 4 Relés	4	Relés 30 Vdc @ 30 A
5	Baterias LiPo	3	LiPo 7.4 Vdc @ 3000 mAh
6	Conversores DC - DC	3	Módulo LM2596

**CONTINÚA** 



7	Sensor Ultrasónico	8	HR - SC04
8	Brújula Electrónica	1	GY - 271
9	Nariz Electrónica	1	-
10	Cámara IP	1	Cámara Wanscam
11	Bombas Neumáticas	2	-
12	Raspberry Pi	1	Raspberry Pi
13	Sensor de corriente	1	Acs - 712

#### **4.1.1. Diseño de módulo para acoplamiento de tensión en el sistema de almacenamiento de energía eléctrica.**

En esta etapa es necesario definir el acondicionamiento para cada uno de los módulos presentes dentro del robot.

Los elementos se clasifican con una estructura modular propuesta de la siguiente manera en función de su modo de operación:

##### **4.1.1.1. Módulo de sensado químico:**

Descripción: Módulo de sensado químico, permite la detección de TNT y pólvora de base doble mediante una cámara de sensores químicos que a través de una bomba neumática aspira una cantidad de aire para su procesamiento.

Componentes: 2 Sensores TGS 822, 2 Sensores TGS 22610, 2 Bombas neumáticas, 1 Sensor de temperatura LM35, 1 módulo de 4 Relés a 5 Vdc.

Características:

- Permite la localización de sustancias explosivas en ambientes controlados.
- Identificación y selección de sustancias no explosivas frente a sustancias explosivas.

#### **4.1.1.2. Módulo de navegación:**

Descripción: Modulo de navegación, permite la detección de obstáculos, así como el posicionamiento en 2 ejes para establecer la dirección de giro del robot.

Componentes: 8 sensores ultrasónicos HC-SR04, 1 brujula electrónica Gy - 271.

Características:

- Eco localización de obstáculos a distancias comprendidas desde 2 cm a 400 cm.
- Posicionamiento en 3 ejes a través del uso del campo magnético.
- Detección de la dirección de navegación mediante el uso del acelerómetro.

#### **4.1.1.3. Módulo de visión remota:**

Descripción: Módulo de visión remota, permite visualizar video en tiempo real del entorno en la que la plataforma interactúa.

Componentes: Cámara Ip Wanscam.

Características:

- Conexión remota a través de Wi-Fi con ordenador.
- Seguridad de la interfaz de visión remota protegida por usuario y contraseña.

- Capacidad de visión nocturna.
- Capacidad de giro en 2 ejes (Horizontal: 355°, Vertical: 90°)

#### **4.1.1.4. Módulo de movimiento:**

Descripción: Módulo de movimiento, permite el desplazamiento del robot mediante la activación de los motores en las ruedas de la plataforma Dagu.

Componentes: 1 módulo de 4 Relés a 5 VDC, Driver para motor DC.

Características:

- Permite el movimiento del robot mediante configuración de relés en forma de puente H.
- Establece la velocidad de movimiento del robot.

#### **4.1.1.5. Módulo de procesamiento:**

Descripción: Modulo de procesamiento, permite establecer algoritmos para que el robot ejecute diferentes tareas.

Componentes: 1 Arduino Due, 1 Raspberry Pi 3.

Características:

- Permite la adquisición de datos del módulo de sensado químico y del módulo de baterías.
- Establece el procesamiento de los datos del módulo de baterías y del módulo de sensado químico.

- Procesa un algoritmo de control de reglas que permite la activación de los demás módulos de acuerdo al estado de carga de las baterías.
- Estima el estado de carga presente en las baterías del robot móvil.

#### 4.1.1.6. Módulo de baterías:

Descripción: Modulo de baterías, permite brindar al robot de energía eléctrica además de medir el consumo de corriente total.

Componentes: 3 baterías Li-Po de 7,4 Vdc @2200 mAh, 1 sensor de corriente Acs-712.

Características:


- Permite la medición de corriente total del robot móvil.
- Brinda energía eléctrica al robot móvil.

A continuación se enumeran en la Tabla 4 las características técnicas necesarias para cada módulo en el robot Dagu.

**Tabla 4**

*Características técnicas para módulos de robot Dagu*

<b>MÓDULO</b>	<b>ELEMENTOS</b>	<b>VOLTAJE- CORRIENTE DE CONSUMO.</b>
<b>Módulo de Baterías</b>	3 Baterías Li-Po	7.4 Vdc – 3000mAh
	1 Sensor de corriente Acs712	5 Vdc – 200 mA

**CONTINÚA** 

<b>Módulo de Procesamiento</b>	1 Arduino Due	5Vdc – 200 mA
	1 Placa Raspberry Pi 3	5Vdc – 200 mA
<b>Módulo de Movimiento</b>	8 Relés electromecánicos	5Vdc – 200 mA
	1 Driver para motor DC	6 Vdc a 30 Vdc – 3A
<b>Módulo de visión remota</b>	1 Cámara IP	5 Vdc – 500 mA
<b>Módulo de Navegación</b>	8 Sensores Ultrasónicos	5 Vdc - 250mA
	1 Magnetómetro GY-271	5 Vdc – 200 mA
<b>Módulo de Sensado Químico</b>	2 Sensores TGS 822	<24 Vdc 62 mA
	2 Sensores TGS 22610	5 Vdc 3 mA
	2 Bombas neumáticas	12 Vdc – 1500 mA
	4 Relés Electromecánicos	5 Vdc – 200 mA

Las características técnicas de los módulos que conforman el robot de detección química de sustancias explosivas, requiere de seleccionar una fuente de energía eléctrica con dos tipos de niveles de tensión diferentes. Inicialmente como fuente de energía de alimentación principal se decidió escoger a 3 baterías Li-Po de 7,4 Vdc a 3000mAh, para lograr una conversión a los niveles requeridos por la Tabla 4, se ha decidido escoger convertidores DC – DC, por la versatilidad en su uso, su gran eficiencia y por ser muy utilizados en aplicaciones de potencia. (Arias Armijos, 2017)

Por lo tanto se han escogido dos convertidores:

- Un convertidor DC - DC elevador que permita subir el nivel de tensión de 7,4 Vdc de las baterías a 12Vdc, para obtener el voltaje requerido para encender el módulo de visión remota.
- Un convertidor DC - DC reductor que permita bajar el nivel de tensión de 7,4 Vdc de las baterías a 5Vdc, para obtener el voltaje requerido para encender los módulos de sensado químico, navegación y procesamiento.

Como se puede observar en la **Tabla 5**, se enuncian las características técnicas de los convertidores DC – DC que se han escogido para lograr los niveles de voltaje:

**Tabla 5**

*Características técnicas de los convertidores DC – DC a usarse dentro del proyecto.*

<b>Nombre</b>	<b>Serie</b>	<b>Características técnicas</b>
<b>Convertidor Reductor</b>	Lm - 2596	Vin: 4.5Vdc - 40Vdc, Vout: 1.5V – 35 Vdc Iout: Hasta 3000 mA
<b>Convertidor Elevador</b>	Lm – 2577	Vin: 4.5Vdc - 40Vdc, Vout: 4V – 35 Vdc Iout: Hasta 3000 mA

Una vez definido los convertidores a usar con sus respectivas características técnicas, es importante definir un último módulo adicional que trabajará a la par con el módulo de baterías. El módulo de energía es el encargado de convertir los valores de tensión de las baterías tal y como se muestra en la Tabla 5, además de añadir un circuito que regula

una tensión de 5 [V] para la activación de la tarjeta de desarrollo y procesamiento Raspberry Pi.

El módulo de energía estaría de tal manera conformado por:

#### **4.1.1.7. Módulo de energía:**

Descripción: Modulo de energía, permite la conversión del voltaje de las baterías a niveles para la activación de los demás módulos.

Componentes: 2 LM 2596, 1 Regulador de voltaje 7805 y 1 LM 2577.

Características:

- Convierte el voltaje presente en la batería en niveles de 5 Vdc y 12 Vdc para los diferentes módulos del robot.

## **4.2. Diseño de la estrategia de control basada en reglas para el robot móvil Dagu Wild Thumper**

El presente trabajo investigativo se basa en el control de todas las cargas presentes en el robot Dagu. Para lograr esta tarea lo primero que se realizó fue asignar las reglas de control que no son más que condiciones de funcionamiento de cada uno de los módulos revisados en la Tabla 4.

### **4.2.1. Etapa de control:**

La etapa de control como tal es de vital importancia en el funcionamiento final del robot usado en la detección de sustancias explosivas. Durante la implementación de esta etapa se trató de identificar dos clasificaciones para la ejecución de las reglas, la

primera que se logró identificar fue la clasificación de módulos en función del porcentaje de estado de carga. Como se puede apreciar en la Tabla 6, existen intervalos de porcentaje definidos de la siguiente manera:

**Tabla 6**

*Condiciones en función de porcentaje de batería.*

<b>CONDICIÓN DE CARGA</b>	<b>INTERVALO EN PORCENTAJE</b>
Recién Cargada	100% - 81%
Cargada	80% - 41 %
Carga Limitada	40% - 21%
Recargar Batería – Límite aconsejable	20 % - 11 %
Peligro para los aparatos conectados	10% - 1%
No consumir – Recargar inmediatamente	0%

Fuente: (Easybattery Norauto.Co. 2012)

La Tabla 6 muestra seis diferentes estados en los que se puede encontrar las baterías Li-Po a lo largo del ciclo de carga de las baterías. El algoritmo de reglas en primera instancia trata de identificar qué porcentaje de batería existe en la batería para en base a este criterio, controla el encendido y apagado de los elementos que conforman cada uno de los módulos del robot Dagu. Una vez revisado los seis estados en los que puede encontrarse la batería dependiendo su porcentaje, se debe decidir en qué momento apagar los módulos. La Tabla 7 muestra la forma en como los módulos y sus elementos van a irse apagando de forma que el porcentaje llegue a 0%, en base a experimentación y medición de corrientes de cada elementos que conforman los módulos. De hecho un criterio usado para seleccionar los límites de los dos últimos módulos encendidos fue el



proporcionado por Buchman (2017), que realiza una comparativa entre profundidad de descarga y ciclos de vida que poseen las baterías de polímero de litio, en el que enuncia que si se le somete a un valor de 90% de profundidad de descarga se podrán obtener aproximadamente 1200 ciclos de descarga, dando lugar a una aceptable vida útil de la batería.

**Tabla 7**

*Control de cargas en función de porcentaje de baterías.*

<b>Reglas de control</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Consumo de corriente por módulo (mA)</b>	<b>Módulos</b>	<b>Consumo total de corriente</b>
<b>1ero</b>	Desactivación al		Módulo de sensado químico	4947 mA
	75%	1577	Cámara de sensado	
	75%		Bomba neumática	
<b>2do</b>	Desactivación al		Lm35	3370 mA
	50%	444	Módulo de visión remota	
<b>3ro</b>	Desactivación al		Ip Cámara	2900 mA
	13%	2167	Módulo de movimiento	
<b>4to</b>	13%			Módulo de 4 Relés
	Desactivación al		Driver Motor Dc	
	11%	118	Módulo de navegación	
<b>5to</b>	11%		Sensores Ultrasónicos	559 mA
	Desactivación al	200	Brújula electrónica	
	9%		Raspberry Pi 3	
	Modo de Bajo consumo al 9 %	150	Arduino DUE	409 mA

Como se pudo apreciar en la Tabla 7, existen módulos que independientemente del porcentaje de baterías están encendidos, esto quiere decir que se convierten en módulos

imprescindibles, ya que con la ausencia de algunos de estos módulos no se podría ejecutar alguna acción importante o a su vez el control de cargas. Estos módulos imprescindibles son:

- Módulo de baterías: El módulo de baterías es el más importante de todos, ya que si se encontrara ausente, todos los demás módulos no podrían estar encendidos.
- Módulo de procesamiento: El módulo de procesamiento es otro módulo imprescindible ya que es el encargado de ejecutar las rutinas de código de sensado químico, movimiento, control de cargas y medición de estado de carga.
- Módulo de energía: El módulo de energía es el encargado de convertir valores de tensión ajustables para encendido de los demás módulos, es un complemento del módulo de baterías.

La Tabla 7 además cuenta con los módulos restantes, que comenzaran a apagarse mientras las baterías pierdan su carga inicial, quedando la disposición de apagado en el siguiente orden en forma descendente:

Módulo de sensado químico: Se estableció que el primer módulo en apagarse sea el módulo de sensado químico ya que de acuerdo a la Tabla 7, posee un consumo de corriente de aproximadamente 1577 mA, lo que en global con todo el robot en conjunto posee un consumo de corriente de 4947 mA.

- Bombas neumáticas y nariz electrónica: Se decidió apagar a este módulo cuando esté al 75 % debido a que corresponde a tener máximo 10 ciclos de sensado.

Módulo de Visión remota: El módulo de visión remota posee un consumo de corriente de 444 mA, teniendo en cuenta que el módulo de sensado químico ha sido desactivado, se tiene un consumo total de corriente 3370 mA.

- Cámara Ip: Se apagará este módulo cuando el porcentaje de la batería esté al 50 %.

Módulo de Movimiento: El módulo de movimiento posee un consumo de corriente de 2167 mA, siendo más significativo en comparación a los demás módulos, pero se ha decidido apagarlo en tercer lugar debido a que la principal prioridad del robot es movilizarse. El consumo global actual del robot sin los anteriores módulos desactivados es de 2900 mA.

- Módulo de 4 relés y driver motor Dc: El módulo de movimiento se apagará cuando el porcentaje de batería se encuentre en 13 %.

Módulo de Navegación: El módulo de navegación posee un consumo de corriente de 118 mA, debido a que el módulo de sensado químico, el módulo de visión remota, el módulo de movimiento han sido desactivados, se tiene un consumo total de corriente de 759 mA.

- Brújula electrónica Gy – 271 y 8 Sensores Ultrasónicos HC - SR04: El módulo se apagará cuando las baterías estén en un estado inferior a 11%.

A partir de este punto, se sabe que las baterías se encontrarán al 9%, un drenaje de energía inferior a este valor sería contraproducente en las características de desempeño eléctricas de la batería, ya que la batería comienza a perder su capacidad de carga. (Viera Perez, 2003) Por lo tanto es necesario cuidar aún más el consumo de energía eléctrica, para no afectar de alguna manera las baterías, o en su caso afectar en menor medida el daño en las baterías. Debido a esta razón se realiza un control adicional en el que se

apaga remotamente la Raspberry Pi 3 y la plataforma Arduino DUE entrará en modo de bajo consumo energético. Dicho de otra manera:

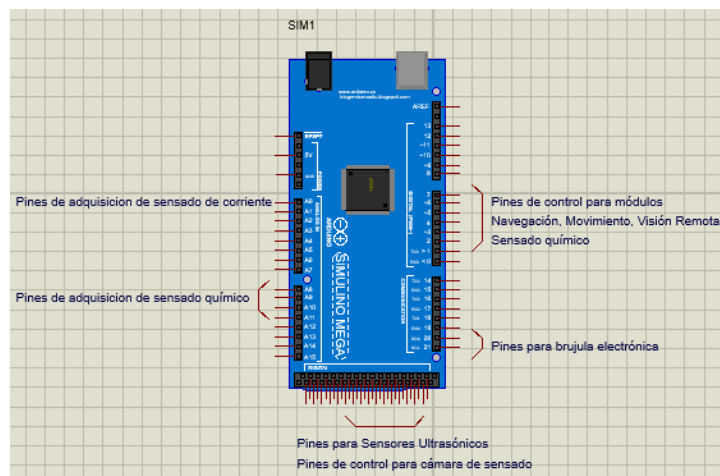
Módulo de Procesamiento: El módulo de navegación posee un consumo de corriente de 118 mA, teniendo en cuenta que el módulo de sensado químico, el módulo de visión remota, el módulo de movimiento han sido desactivados, se tiene un consumo total de corriente de 350 mA.

- Raspberry Pi 3: La tarjeta Raspberry Pi 3 se apagará cuando la batería tenga un valor inferior a 9%.
- Arduino DUE: La plataforma Arduino Due entrará en modo de bajo consumo cuando la batería tenga un valor inferior a 9%.

Con la aplicación de todas las reglas de control para las baterías LiPo, se logrará una mejor administración de la energía almacenada mejorando la autonomía del robot Dagu, a pesar de no cumplir con el criterio del 20 % del DOD, se llega a establecer un vida útil aceptable de las batería de polímero de lito, en el que se podría obtener hasta aproximadamente 1200 ciclos de carga. El algoritmo de control se va a llevar a cabo en el microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 de 32 bits pertenecientes a la plataforma de Arduino DUE, debido a que es un control basado en reglas, donde los objetos a ser controlados serán los módulos enunciados anteriormente, se escogerán seis pines de la placa Arduino que son los siguientes:

- Pin 2: Pin encargado del control de las bombas neumáticas, pertenecientes al módulo de sensado químico.

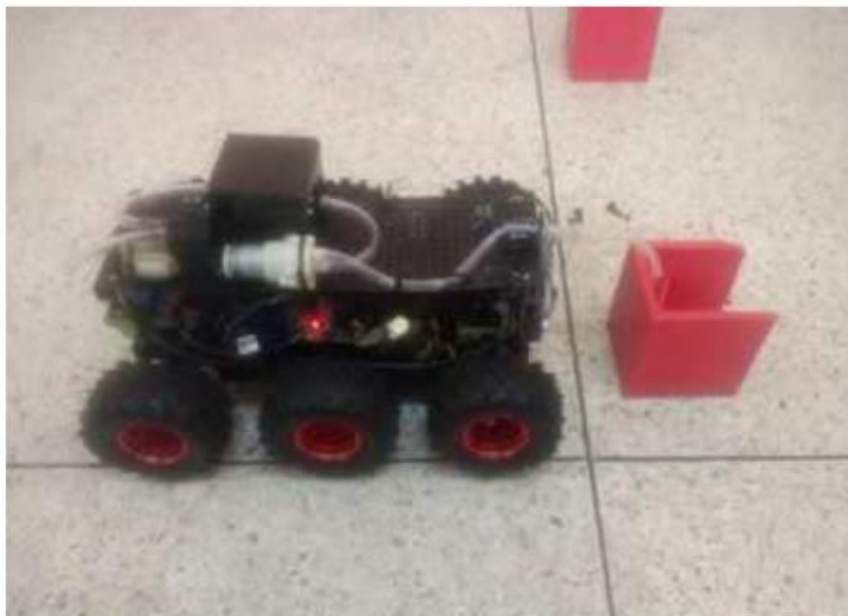
- Pin 3: Pin encargado del control de los 8 sensores ultrasónicos, pertenecientes al módulo de navegación.
- Pin 4: Pin encargado del control del magnetómetro, perteneciente al módulo de navegación.
- Pin 5: Pin encargado del control del driver para motor dc, perteneciente al módulo de movimiento.
- Pin 6: Pin encargado del control de la cámara de sensado, perteneciente al módulo de sensado químico.
- Pin 7: Pin encargado del control de la cámara ip, perteneciente al módulo de visión remota.



**Figura 10.** Distribución de pines dentro de la plataforma Arduino

Mientras que la adquisición de datos de corriente la plataforma de Arduino será por parte del sensor Acs - 712 y se lo realizará por medio del módulo de conversión análogo digital situado en el pin A0. El control de movimiento, la asignación de pines de los sensores ultrasónicos, el uso de la brújula electrónica conjuntamente con la cámara Ip y

la cámara de sensado han sido conservadas de acuerdo a los proyectos de investigación realizados por Arias (2017), Alejandro y Venegas(2017).



**Figura 11.** Robot de detección de sustancias explosivas Dagú  
Fuente: (Alejandro & Venegas, 2017)

Como tal este proyecto es un complemento al anterior trabajo de titulación que propone una opción para la detección de sustancias explosivas, mediante la utilización de una cámara de sensores químicos denominada nariz electrónica, haciendo uso de cuatro sensores (2 TGS 822 y 2 TGS 22610), dos bombas neumáticas para el ingreso y salida de flujo de aire y un bloque de adquisición de datos. (Alejandro & Venegas, 2017)

#### 4.2.2. Etapa de potencia:

La etapa de potencia es otra parte importante dentro de la movilidad del dispositivo debido a que brinda el nivel de voltaje necesario para el funcionamiento de la cámara, de las bombas neumáticas que forman parte de los módulos; así también como de controlar la velocidad y sentido de giro en los motores. El movimiento del robot Dagu está compuesto en las siguientes dos fases:

- El movimiento de giro que realiza el robot apoyándose sobre sus ruedas.
- El movimiento lineal donde a través de una cierta propulsión el robot avanza.

Además en esta etapa se realizó la medición y comparación de los valores teóricos de corriente especificada por el fabricante con los valores reales del robot Dagu, con la finalidad de tener un dimensionamiento óptimo para los elementos electrónicos que intervienen en esta etapa.

**Tabla 8**

*Mediciones de corriente de cada módulo.*

<b>Módulos</b>	<b>Valor Teórico (mA)</b>	<b>Valor Medido (mA)</b>	<b>Error de medición (%)</b>
<b>Módulo de Movimiento</b>	2200	2167	1.5
<b>Módulo de Sensado químico</b>	1600	1577	1.43

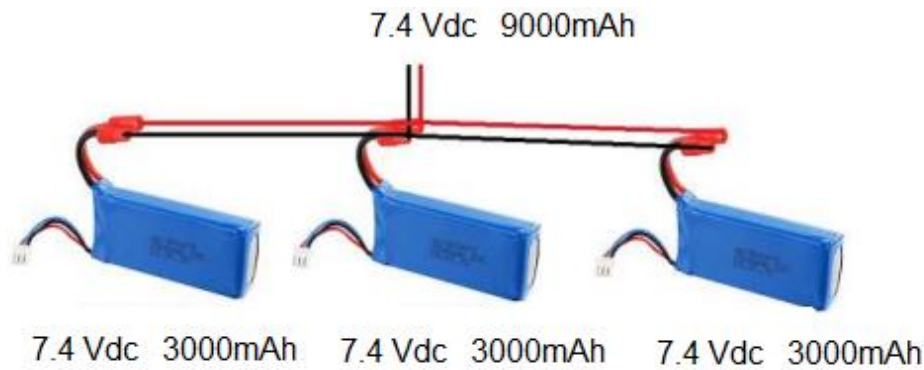
**CONTINÚA** 

<b>Módulo de visión remota</b>	450	444	1.33
<b>Módulo de navegación</b>	120	118	1.66
<b>Módulo de procesamiento</b>	350	346	1.4
<b>Módulo de energía</b>	300	295	1.66
<b>Total</b>	5020	4947	1.45%

La Tabla 8 muestra valores de corriente de cada uno de los módulos, y valores que se obtuvieron durante la fase de experimentación con el sensor de corriente Acs-712. Cada valor de corriente obtenido representa la media de un banco de datos. A lo largo del análisis de la tabla de datos se obtiene que el error del sensor de corriente Acs-712 es de aproximadamente 1.45% lo que se verifica conforme a la hoja de datos técnicos del sensor. (Allegro, 2014) La experimentación se la comenzó a realizar de la siguiente manera, se procedió a energizar cada motor del robot con una batería Li-Po de 7.4V se obtuvo una corriente pico de 0.67 [A] y una Corriente nominal: 0.34 [A]. El consumo de corriente al energizar todos los motores a 7.4V es de 2.16A (0.34A x 6 motores). El consumo de corriente del driver para el motor dc es de 40mA. Realizando un cálculo teniendo en cuenta la potencia suministrada por la fuente para que el dispositivo móvil se encuentre operativo mínimo dos horas debe ser aproximadamente de 46W. (Arias Armijos, 2017)



Para satisfacer esta necesidad se seleccionó 3 baterías LIPO de dos celdas en serie de 7.4V a 3000mA conectados en paralelo, tal y como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.** Fuente de alimentación de energía eléctrica principal

Una vez dicho esto se debe considerar la tensión de operación del microcontrolador, cámara ip, sensores y actuadores, por tal motivo se seleccionó conversores Buck DC-DC (reductores), que trabajan con niveles de voltajes que van desde los 1.2V hasta 37V, con una corriente máxima igual a 3A sin disipador y 5A con disipador (Texas Instruments, 2013). Para lograr su implementación se energizó cada componente y se estableció que el consumo de corriente para cada elemento de acuerdo a la Tabla 6. Como tal las salidas digitales de la plataforma Arduino Due puede controlar cargas que no consuman más allá de 400mA (Arduino, 2005), por lo tanto debe existir un acoplamiento de la etapa de control hacia la etapa de potencia, la cual se la realizó por varios módulos de 4 relés, tal y como se ve en la Figura 13. Los módulos de relés son capaces de soportar cargas de hasta 10A. (Allegro, 2014) Debido a la necesidad de poder controlar cada uno de los módulos anteriormente enumerados, cada módulo de relé cumple con su función específica.

- Un módulo es encargado de generar una doble configuración de puente H para el control de giro de los motores. (Arias Armijos, 2017)



**Figura 13.** Módulo de Relés para Arduino.

- Dos módulos son encargados del control de activación y desactivación de cada uno de los elementos que conforman los módulos.
- Un módulo adicional es encargado de controlar el encendido individual de las bombas neumáticas. (Arias Armijos, 2017)

#### 4.3. Cálculo para duración de batería recargable en el robot Dagu Wild Thumper

El cálculo para la duración de las baterías durante el funcionamiento del robot Dagu Wild Thumper, se lo realiza en base a los valores obtenidos de la hoja de datos técnicos y recopilados en la Tabla 8, por lo que se estima de manera teórica el tiempo de uso de la batería hasta que necesite un nuevo ciclo de recarga de baterías.

$$Tiempo\ de\ uso = \frac{Corriente\ de\ fuente}{Corriente\ de\ carga} \quad (6)$$

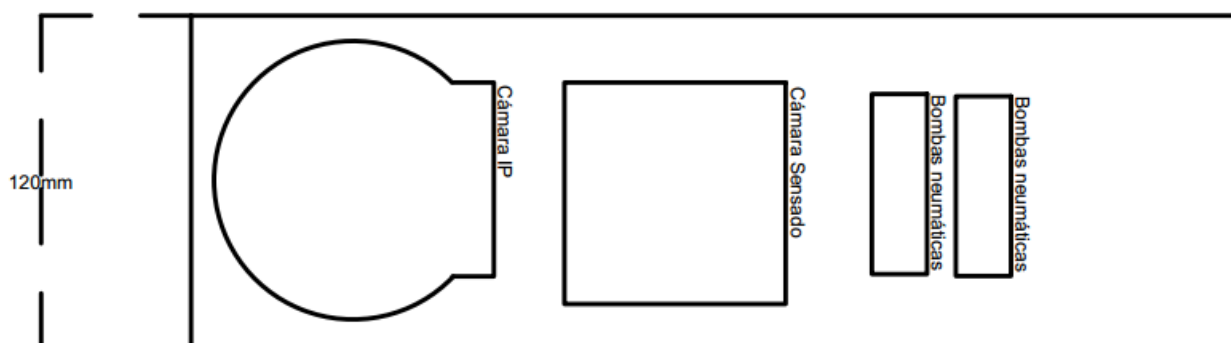
$$Tiempo\ de\ uso = \frac{9\ [A]}{5.02\ [A]}$$

$$Tiempo\ de\ uso = 2\ horas\ 20\ minutos.$$

El tiempo de uso del robot Dagu se limita teóricamente a un tiempo de 2 horas con 20 minutos.

#### 4.4. Montaje de elementos en la plataforma Dagu Wild Thumper.

Para finalizar la etapa de potencia es necesario definir la distribución de los elementos electrónicos en la plataforma Dagu Wild Thumper, teniendo en cuenta las medidas de cada elemento que conforma parte de los módulos expuestos anteriormente en la Tabla 3, se llegó a la siguiente distribución:

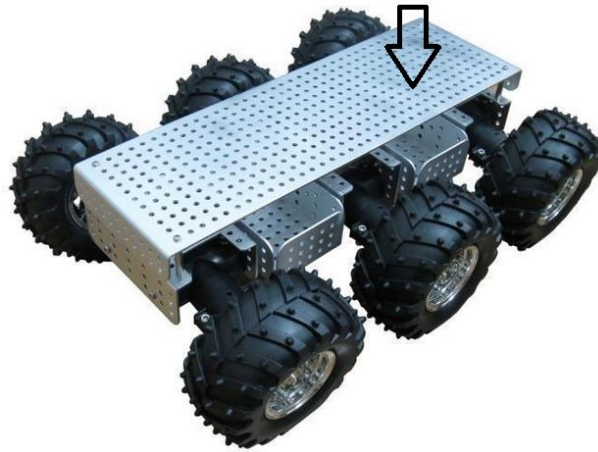


#### Vista superior anversa - Plataforma superior

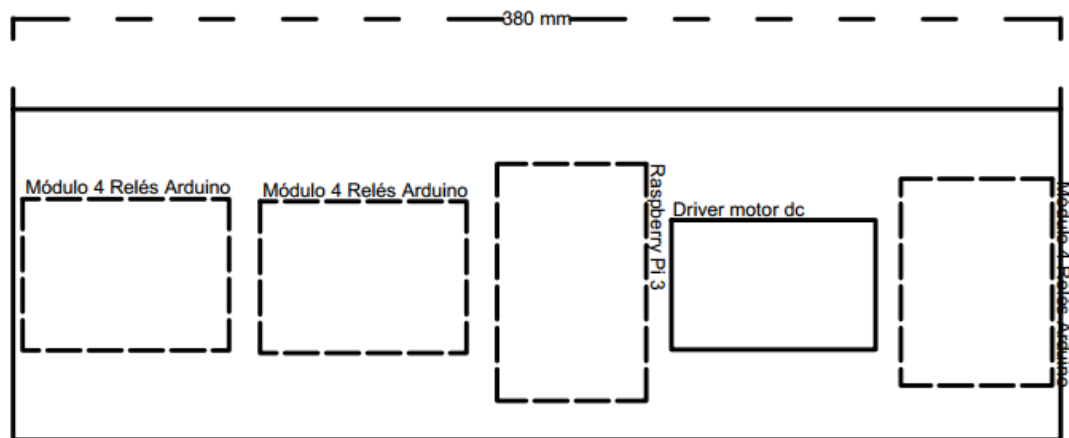
**Figura 14.** Vista superior anversa de la plataforma Dagu

En la plataforma superior anversa de la plataforma Dagu se encontrarán lo siguientes elementos, tal y como se ve en la Figura 14:

- Cámara Ip
- Cámara de sensado químico.
- 2 Bombas neumáticas.



**Figura 15.** Vista superior anversa de la plataforma Dagu

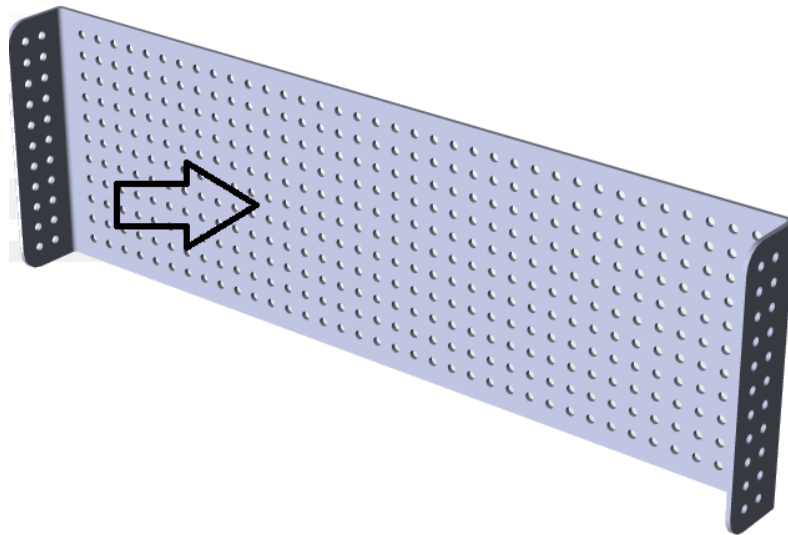


### Vista superior reversa - Plataforma superior

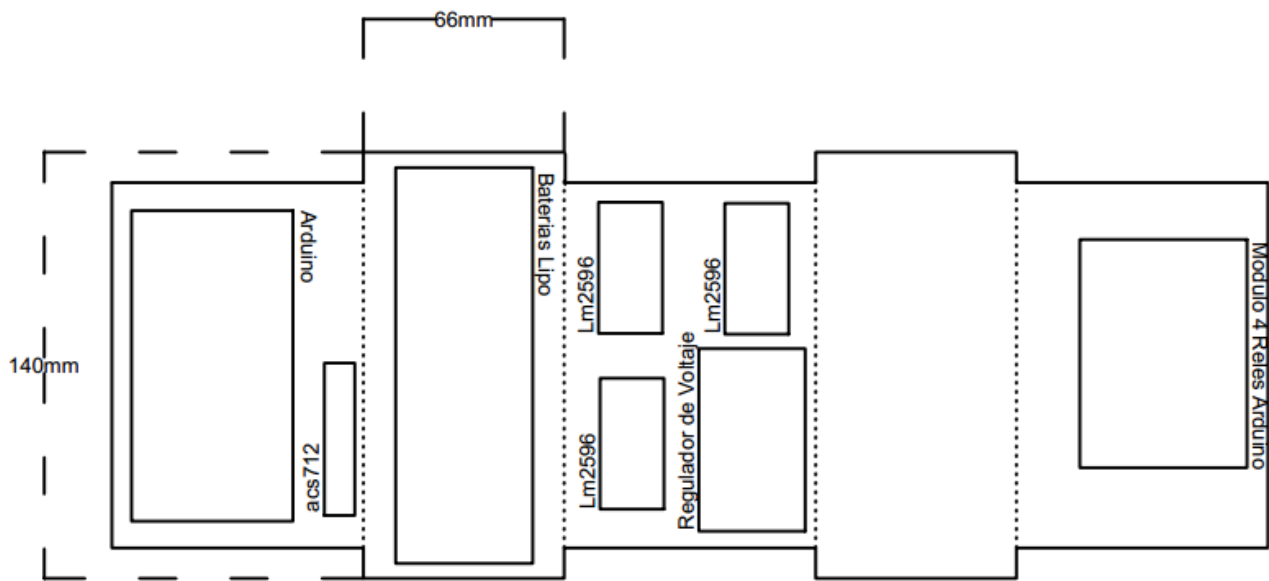
**Figura 16.** Vista superior reversa de la plataforma Dagu

En la plataforma superior reversa de la plataforma Dagu se encontrarán lo siguientes elementos:

- 3 módulos de 4 relés.
- 1 Placa raspberry pi 3.
- 1 Driver de motor dc.



**Figura 17.** Vista lateral reversa de la plataforma dagu.



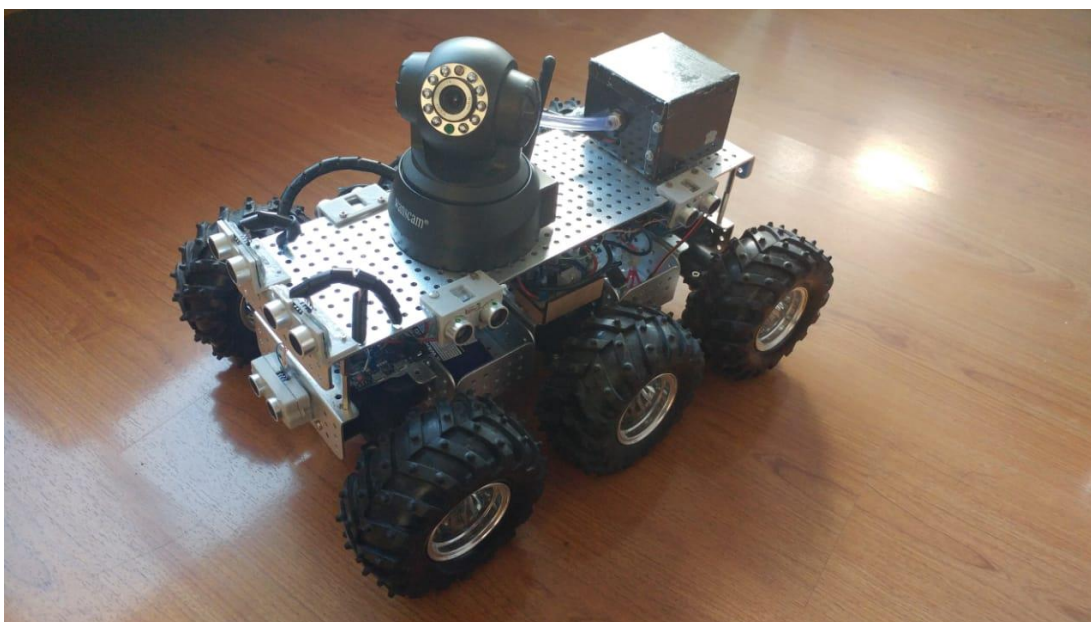
### Vista superior anversa - Plataforma inferior

**Figura 18.** Vista superior anversa de la plataforma Dagu

En la plataforma superior anverso de la plataforma Dagu inferior se encontrarán lo siguientes elementos:

- 1 Arduino due.

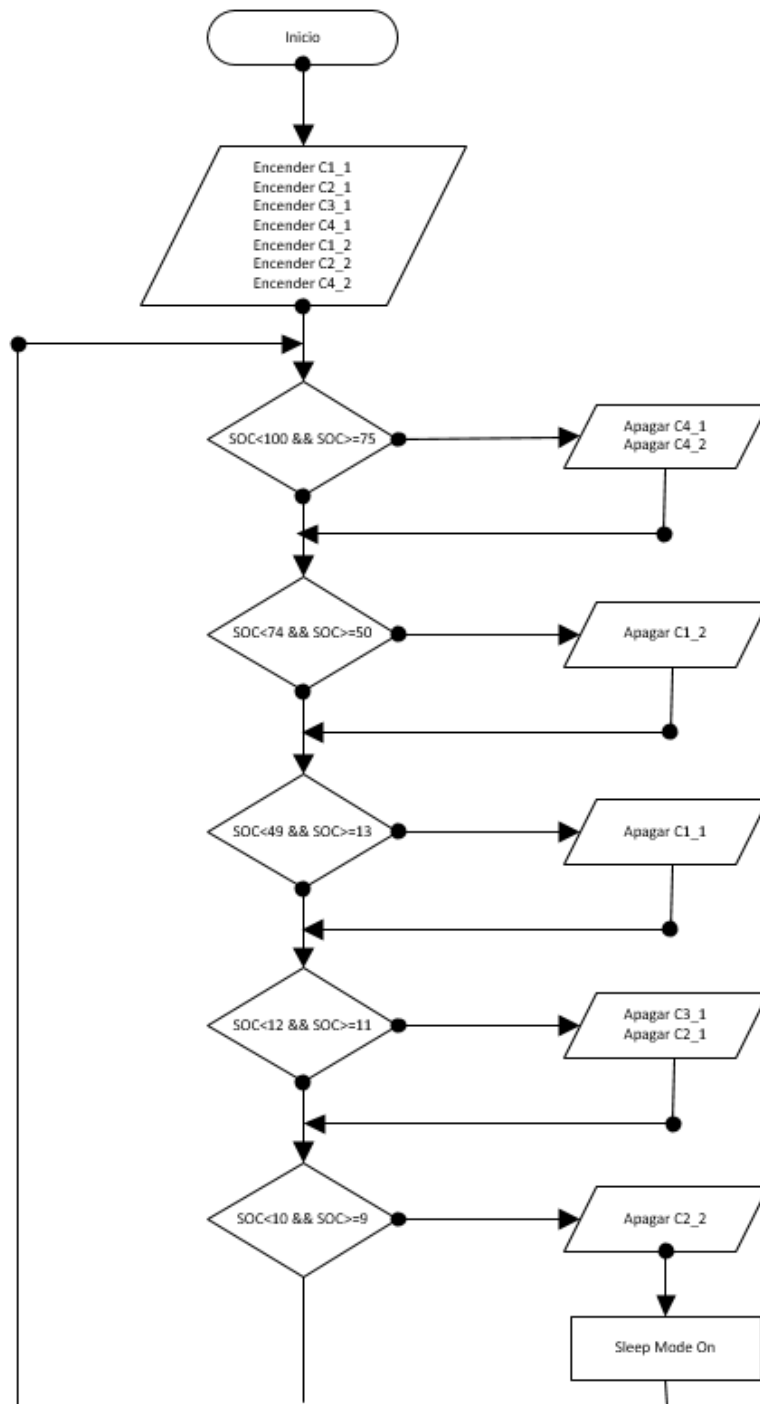
- 1 sensor de corriente Acs-712.
- 3 baterías Li-Po.
- 3 Conversores DC - DC Lm 2596.
- 1 Regulador de voltaje 7805.
- 1 Módulo de 4 relés.



**Figura 19.** Vista superior del robot de detección de sustancias explosivas.

#### **4.5. Implementación de la estrategia de control basada en reglas con el algoritmo de estimación del estado de carga.**

La estrategia de control basada en reglas como tal depende del valor de estado de carga almacenado en la variable SOC, obtenido del algoritmo propuesto dentro del capítulo 3. La Tabla 7 enuncia los parámetros que se utilizaron para diseñar el algoritmo de control de reglas. A continuación se muestra el diagrama de flujo que lo representa:



**Figura 20.** Diagrama de flujo del algoritmo de control de reglas.

El anterior diagrama de flujo posee como tal dos fases las cuales se explicarán a continuación:

- La primera fase consiste en la inicialización de las variables que ejercerán la activación y desactivación de las señales de control para cada uno de los elementos que conforman los módulos del robot enunciados en la Tabla 4.

Las variables que se enuncian dentro de esta primera etapa son las siguientes:

### **Tabla 9**

*Tabla de variables de control para algoritmo de reglas.*

<b>Variables de control</b>	<b>Descripción</b>
<b>C1_1</b>	Control del relé #1 del primer bloque de 4 relés que corresponde al driver del motor dc del módulo de movimiento.
<b>C2_1</b>	Control del relé #2 del primer bloque de 4 relés que corresponde a la brújula electrónica del módulo de navegación.
<b>C3_1</b>	Control del relé #3 del primer bloque de 4 relés que corresponde a los sensores ultrasónicos del módulo de navegación.

**CONTINÚA** 



<b>C4_1</b>	Control del relé #4 del primer bloque de 4 relés que corresponde a las bombas neumáticas del módulo de sensado químico.
<b>C1_2</b>	Control del relé #1 del segundo bloque de 4 relés que corresponde a la cámara ip del módulo de visión remota.
<b>C2_2</b>	Control del relé #2 del segundo bloque de 4 relés que corresponde al apagado de la Raspberry Pi 3.
<b>C4_2</b>	Control del relé #4 del segundo bloque de 4 relés que corresponde a la cámara de sensado del módulo de sensado químico.

- La segunda fase consiste en verificar continuamente en que porcentaje de batería se encuentra la variable SOC, enunciada en el algoritmo de medición de estado de carga en el capítulo 3 del presente trabajo.

Como se ha visto en la Tabla 7, existen intervalos de operación de los módulos en función del estado de carga. Para determinar los intervalos que rigen el control de reglas, se realizó varios tipos de experimentación los cuales estuvieron sujetos a ciertas características las cuales se describen a continuación de manera descendente:

- Regla 1: El intervalo que rige la primera regla va desde que la batería se encuentra en 100% hasta que llega al 75%. Para establecer los límites de funcionamiento dentro de la primera regla, se decidió establecer como máximo 10 ciclos de sensado químico en los cuales intervienen las bombas neumáticas.
- Regla 2: La segunda regla sitúa su intervalo desde que el porcentaje de batería se encuentra en el 74 % hasta que llega al 50 %. Esta regla es la encargada de controlar el encendido y apagado del módulo de visión remota. Durante la fase de experimentación se determinó que para definir el límite mínimo del intervalo, se debía asegurar por lo menos la mitad del total de la batería para tener la capacidad de video remoto a través de la cámara Ip.
- Regla 3: El intervalo que rige la tercera regla controla el funcionamiento del módulo de movimiento, su rango de operación comprende desde que el porcentaje de batería se encuentra en el 49 %. Para definir el tercer intervalo se tomó a consideración, darle movilidad al robot el mayor tiempo posible, guardando un porcentaje de 3 % de reserva para desactivar el módulo de navegación.
- Regla 4: La cuarta regla es aquella que controla el módulo de navegación, el intervalo comprende desde que la batería se encuentra al 12 % hasta que se encuentre al 10%. El módulo de navegación se apaga posteriormente al módulo de movimiento ya que es importante dotarle al robot de posicionamiento e interacción con el ambiente externo.
- Regla 5: Por último la quinta regla se creó con el objetivo de cuidar a las baterías de un drenaje excesivo. Durante la ejecución de esta regla se espera que el porcentaje

de batería baje a un valor inferior del 10 %, si esto sucede se espera que la batería empiece a perder sus características eléctricas así como su capacidad para almacenar energía. (Bianchi, 2011). Una vez dentro de esta regla el microcontrolador se encarga de desactivar la plataforma Raspberry Pi a través de sus puertos de entrada, además de ingresar en un modo de bajo consumo de energía que limita aún más el consumo de corriente.

Una vez que se ha explicado cada una de las reglas de funcionamiento y sus respectivos intervalos, es necesario fusionar cada algoritmo desarrollado dentro de la plataforma Arduino Due. Inicialmente dentro del microcontrolador se encontraron embebidos las siguientes rutinas de programación:

- La primera rutina pertenece al movimiento del robot, esta establece una comunicación serial entre la Raspberry Pi 3 y Arduino, en la que a través del envío de caracteres, se mueve en la dirección en la que se le indique.
- La segunda rutina pertenece al sensado químico, esta establece la adquisición de datos de la cámara de sensado para su procesamiento en la tarjeta Raspberry Pi 3.

Además se añaden dos algoritmos adicionales los cuales pertenecen a la medición de estado de carga y al control de los módulos a través de reglas. Con la necesidad de tener 4 algoritmos dentro del microcontrolador, se ha decidido implementar cada uno utilizando un tipo de programación especial basado en sistemas operativos en tiempo real. De hecho estos sistemas operativos convierten la programación sistemas embebidos complejos en algo fácil de procesar, ya que estructura el funcionamiento en forma de tareas de tal manera que ofrece un mejor desempeño del procesador en función de las

prioridades de ejecución. (Buonocunto, 2015) Una vez definida la forma de programación basados en sistemas operativos en tiempo real, es necesario establecer el nivel de prioridad de las tareas, como recomienda Buonocunto (2015).

**Tabla 10**

*Tabla de prioridades*

<b>Tarea</b>	<b>Prioridad</b>	<b>Descripción</b>
<b>Movimiento</b>	1	Se encarga del movimiento del robot
<b>Navegación</b>	2	Se encarga de establecer el posicionamiento e interacción del robot con el ambiente externo.
<b>Sensado químico</b>	3	Se encarga de la adquisición de datos de la cámara de sensado.
<b>Estado de carga</b>	4	Se encarga de la estimación del porcentaje de estado de carga de las baterías del robot Dagu.

## CAPITULO 5

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se describe la etapa de pruebas con el fin de verificar el funcionamiento y la integración del algoritmo de medición de estado de carga con el algoritmo de reglas de control de módulos usando sistemas operativos en tiempo real. Además se evaluó el grado de efectividad del algoritmo de control de módulos. Para determinar los resultados se realizaron un total de 35 pruebas desde el 05/07/2018 hasta el 2/08/2018 en un horario comprendido entre las 10:00am hasta las 16:00pm.

La experimentación total tuvo 3 fases, las cuales se detallarán a continuación.

#### **5.1. Primera Fase Pruebas: Medición de corriente con sensor Acs – 712.**

Durante la primera fase se realizó varios experimentos, los cuales consistieron en medir el consumo de corriente de cada uno de los módulos propuestos durante el capítulo 4.

Consideraciones:

- Establecer el funcionamiento del módulo ACS 712.
- Implementar una ecuación que determine una relación entre la corriente medida, con el valor de voltaje de salida del módulo.

Inicialmente como se ha descrito a lo largo de los anteriores capítulos se utilizará dos ecuaciones, la primera corresponde a su valor de tensión adquirida por la variable  $V_{\text{sensor}}$  de la ecuación (4). (Ver **Tabla 2**).

$$V = \frac{V_{ADC}}{1024} * 5 [V]$$

Mientras que por otro lado se halla la variable I\_sensor (Ver **Tabla 2**) donde se hace uso de la ecuación (5):

$$I = \frac{V_{0-5V} - 2.5}{0.185} [A]$$

Posteriormente se calcula el valor correspondiente a corriente de cada uno de los módulos.

```
sensorValor = analogRead (sensor);
V_sensor = sensorValor * conversión;
I_sensor = I_sensor + (V_sensor-2.5)/sensibilidad;
```

***Figura 21.** Código usado para realizar medición de corriente a través del conversor análogo a digital de Arduino.*

La variable I\_sensor, representa una relación proporcional de corriente con respecto a nivel de voltaje, este valor dependerá del valor de sensibilidad de cada sensor, para este caso se trabaja con una constante de 0.185, debido a la sensibilidad proporcionada por el fabricante para el sensor de corriente Acs-712. La constante de conversión es un valor que permite la conversión a un intervalo de voltaje (0 – 5 Vdc), del valor obtenido del conversor análogo digital.

**Tabla 11**

Tabla de datos para medición de sensado de corriente del módulo de visión remota

<b>Corriente</b>	<b>Voltaje</b>
I <sub>in</sub> = 0.43 [A]	V <sub>in</sub> =2.583 [V]
I <sub>in</sub> = 0.43 [A]	V <sub>in</sub> =2.582 [V]
I <sub>in</sub> = 0.43 [A]	V <sub>in</sub> =2.583 [V]
I <sub>in</sub> = 0.43 [A]	V <sub>in</sub> =2.582 [V]
I <sub>in</sub> = 0.43 [A]	V <sub>in</sub> =2.582 [V]
I <sub>in</sub> = 0.43 [A]	V <sub>in</sub> =2.583 [V]

La Tabla 11 muestra un valor de corriente vista en el puerto serial de la plataforma Arduino Due, junto con su par proporcional en voltaje entregado por el módulo Acs-712. Teniendo en cuenta que la medición se debe realizar sin la intervención de otros elementos que no sean parte del experimento, se necesita apagar los demás módulos mientras se requiera medir el consumo de corriente de uno solo. La duración para esta prueba fue de 100 minutos por cada módulo, con una toma de 1 medición cada minuto, con un total de 100 datos. A continuación se muestran varias tablas de cada uno de los módulos y sus respectivos valores estadísticos como varianza, desviación, media, entre otros se obtuvieron de cada medición de corriente por módulo.

**Tabla 12***Datos estadísticos para módulo de sensado químico*

<i>Sensado Químico</i>	
Media	1577,035 [mA]
Mediana	1600 [mA]
Moda	1618 [mA]
Desviación estándar	20,0743618
Varianza de la muestra	402,98
Coefficiente de asimetría	-0,2990581
Mínimo	1562 [mA]
Máximo	1628 [mA]
#Muestras	100

**Tabla 13***Datos estadísticos para módulo de navegación*

<i>Navegación</i>	
Media	118,043 [mA]
Mediana	118,5 [mA]
Moda	121 [mA]
Desviación estándar	4,5872939
Varianza de la muestra	21,0432653
Coefficiente de asimetría	0,01341212
Mínimo	111[mA]
Máximo	126[mA]
#Muestras	100

El conjunto muestral de datos de corriente se realizó por medio del software Matlab, usando la plataforma Arduino Due como medio para su adquisición, posteriormente los datos fueron exportados desde Matlab hacia Microsoft Excel 2013, donde a través de la herramienta de análisis para estadística descriptiva, se procedió a obtener los valores de media, moda, varianza, desviación, asimetría, valor máximo, mínimo y número de muestras. Obteniendo lo siguiente:



**Tabla 14**

*Datos estadísticos para módulo de visión remota.*

<i>Visión remota</i>	
Media	444,001 [mA]
Mediana	451,5 [mA]
Moda	459 [mA]
Desviación estándar	5,58438055
Varianza de la muestra	31,1853061
Coefficiente de asimetría	-0,07926167
Mínimo	441 [mA]
Máximo	459 [mA]
#Muestras	100

**Tabla 15**

*Datos estadísticos para módulo de movimiento.*

<i>Movimiento</i>	
Media	2166,9 [mA]
Mediana	2197,5 [mA]
Moda	2223 [mA]
Desviación estándar	27,8738045
Varianza de la muestra	776,94898
Coefficiente de asimetría	0,01124172
Mínimo	2154 [mA]
Máximo	2243 [mA]
#Muestras	100

**Tabla 16**

*Datos estadísticos para módulo de procesamiento*

<i>Procesamiento</i>	
Media	345,87 [mA]
Mediana	352 [mA]
Moda	354 [mA]
Desviación estándar	4,41999169
Varianza de la muestra	19,5363265
Coefficiente de asimetría	-0,24601472
Mínimo	342 [mA]
Máximo	358 [mA]
#Muestras	100

Una vez halladas las tablas con sus respectivos valores, se tomó como valor de medición real la media de cada tabla por módulo, y se lo comparó con el valor nominal que brinda la hoja de datos técnica de cada elemento. Dando como resultado un error relativo del 1.45%.

## 5.2. Segunda fase de pruebas: Medición de estado de carga.

La segunda fase de las pruebas consiste en verificar el funcionamiento del algoritmo de medición de estado de carga en conjunto con el sensor de corriente Acs-712.

Consideraciones:

- Se pretende determinar el sentido de corriente (positiva y negativa)
- Se imprime los valores obtenidos del estado de carga cada minuto.
- Se relaciona valores de corriente con el estado de carga.

I_in = 0.66, SoC = 95.56, V_in = 2.62	
I_in = 0.66, SoC = 95.54, V_in = 2.62	
I_in = 0.66, SoC = 95.53, V_in = 2.62	
I_in = 0.66, SoC = 95.52, V_in = 2.62	
I_in = 0.66, SoC = 95.51, V_in = 2.62	
I_in = -1.32, SoC = 95.52, V_in = 2.26	
I_in = -1.32, SoC = 95.54, V_in = 2.26	
I_in = -1.32, SoC = 95.56, V_in = 2.26	
I_in = -2.69, SoC = 95.60, V_in = 2.00	
I_in = -3.46, SoC = 95.65, V_in = 1.86	
I_in = -3.46, SoC = 95.71, V_in = 1.86	
I_in = -3.46, SoC = 95.76, V_in = 1.86	
I_in = -3.30, SoC = 95.82, V_in = 1.89	
I_in = -0.55, SoC = 95.86, V_in = 2.40	
I_in = 4.95, SoC = 99.62, V_in = 3.42	I_in = 0.21, SoC = 94.48, V_in = 2.54
I_in = 4.95, SoC = 99.59, V_in = 3.42	I_in = 0.24, SoC = 94.47, V_in = 2.54
I_in = 4.95, SoC = 99.56, V_in = 3.42	I_in = 0.21, SoC = 94.47, V_in = 2.54
I_in = 4.95, SoC = 99.53, V_in = 3.42	I_in = 0.21, SoC = 94.46, V_in = 2.54
I_in = 4.95, SoC = 99.51, V_in = 3.42	I_in = 0.21, SoC = 94.46, V_in = 2.54
	I_in = 2.22, SoC = 94.46, V_in = 2.91

**Figura 22.** Medición de estado de carga en función de su corriente y voltaje

Se realizaron varias pruebas en la cuales se obtuvieron un total de 1800 muestras aproximadamente, en los cuales consiguiendo los siguientes resultados. Durante las pruebas se obtiene mediciones de corriente del sensor Acs-712 que se muestran a través de la consola serial de Arduino. Los valores en color rojo, corresponden a valores

negativos de corriente, técnicamente el signo en la medición significa el sentido que toma la corriente eléctrica y representa si las baterías están entregando energía o a su vez recibiendo energía. Este signo negativo se adquirió mientras se aportaba energía eléctrica desde 3 cargadores LiPo marca imaxRC de 7.4 V, el signo negativo indica que la batería está recibiendo energía eléctrica de una fuente externa.



**Figura 23.** Cargador LiPo de 7.4 V ImaxRC  
Fuente: (Allegro, 2014)

Si una medición de corriente presenta signo negativo, cargará las baterías hasta llegar al 100 % que es el valor límite máximo, mientras que si la corriente es de signo positivo, la variable SOC disminuirá ya que las baterías LiPo aportan energía a todo el robot Dagu.

Como se aprecia en la Figura 23, se aumentó el valor de corriente hasta llegar al valor máximo de 4.95 [A], y un valor mínimo de 0.66 [A], de tal manera que se puedan obtener dos valores de corriente eléctrica cuando los módulos se encuentren totalmente encendidos y el otro valor de corriente eléctrica cuando únicamente esté en funcionamiento el módulo de procesamiento.

El cálculo de corriente total del robot Dagu Wild Thumper, realizado en el capítulo 4, establece que se tiene un consumo de corriente aproximado de 5 [A] lo que asegura un tiempo de funcionamiento de 2 horas 20 minutos, comprobando durante la experimentación se consiguió la duración de 2 horas 18 minutos aproximadamente.

Seguido en otra de las pruebas se encendieron las bombas neumáticas del módulo de sensado químico durante 3 minutos emulando el ciclo de aspiración, y expiración de la sustancia química por parte de la cámara de sensado. Durante este intervalo de tiempo se logró reconocer una medición de 4.9 [A] aproximadamente, mientras que cuando no se encontraba en funcionamiento la bomba neumática se reconocía una corriente de 3.5 [A].

I_in = 3.54 [A], SoC = 99.88 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 99.06 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.86 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.51 [A], SoC = 99.04 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.84 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 99.02 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.82 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 99.00 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.80 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 98.98 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.78 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 98.96 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.51 [A], SoC = 99.76 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 98.94 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.74 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 98.92 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.72 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 98.90 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.71 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 98.88 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.51 [A], SoC = 99.69 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 3.54 [A], SoC = 98.86 %, V_in = 3.15 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.67 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.20 [A], SoC = 98.84 %, V_in = 3.28 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.65 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.33 [A], SoC = 98.82 %, V_in = 3.30 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.63 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.62 [A], SoC = 98.79 %, V_in = 3.35 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.61 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.80 [A], SoC = 98.77 %, V_in = 3.39 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.59 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.94 [A], SoC = 98.74 %, V_in = 3.41 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.57 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.94 [A], SoC = 98.71 %, V_in = 3.41 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.55 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.94 [A], SoC = 98.68 %, V_in = 3.41 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.53 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.91 [A], SoC = 98.66 %, V_in = 3.41 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.51 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.94 [A], SoC = 98.63 %, V_in = 3.41 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.49 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.94 [A], SoC = 98.60 %, V_in = 3.41 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.47 %, V_in = 3.15 [V]	I_in = 4.91 [A], SoC = 98.57 %, V_in = 3.41 [V]
I_in = 3.54 [A], SoC = 99.45 %, V_in = 3.15 [V]	

**Figura 24.** Mediciones de diferentes corrientes eléctricas y su comportamiento en estado de carga

Como se ve en la Figura 25, el color anaranjado corresponde a las mediciones de corriente halladas durante el funcionamiento de las bombas neumáticas, mientras que las mediciones en color negro corresponden a las mediciones de corriente cuando no

están en funcionamiento las bombas neumáticas. Los valores de la variable de estado de carga, se muestran en el monitor serial de la plataforma de Arduino. Finalmente durante las pruebas de funcionamiento de la segunda fase, el funcionamiento del algoritmo de medición de estado de carga fue probado con éxito, lo que concluye y da paso a la tercera fase de las pruebas de funcionamiento.

### 5.3. Tercera fase de pruebas: Funcionamiento de los algoritmos de estado de carga y de control de reglas en el robot Dagú Wild Thumper.

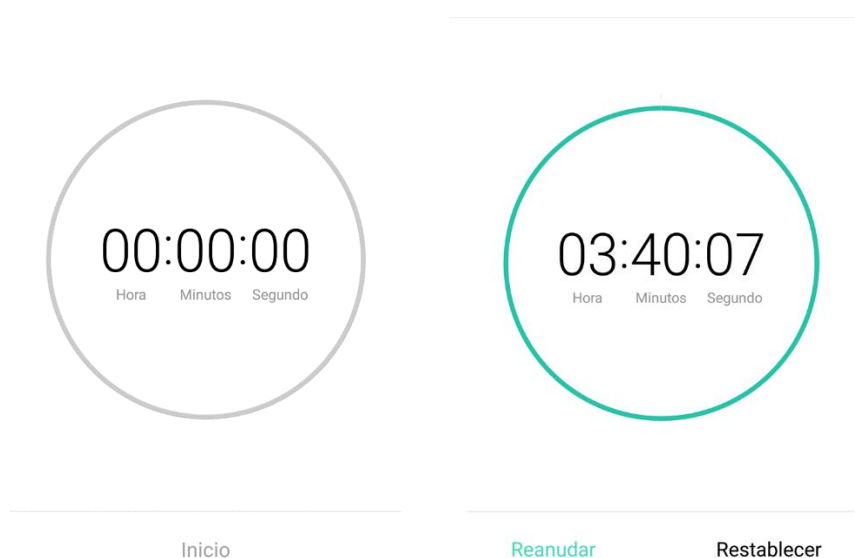
Regla_uno, SoC = 78.96%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.87%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.73%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.84%, I= 0.77[A]
Regla_uno, SoC = 78.95%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.86%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.71%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.83%, I= 0.77[A]
Regla_uno, SoC = 78.95%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.84%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.70%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.83%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.95%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.82%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.68%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.83%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.94%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.81%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.67%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.82%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.94%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.79%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.65%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.82%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.93%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.77%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.64%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.82%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.92%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.76%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.62%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.81%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.91%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.74%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.61%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.81%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.89%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.72%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.59%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.80%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.88%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.71%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.58%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.80%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.86%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.69%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.57%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.80%, I= 0.71[A]
Regla_uno, SoC = 78.83%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.67%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.55%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.79%, I= 0.71[A]
Regla_uno, SoC = 78.81%, I= 4.96[A]	Regla_Dos, SoC = 65.66%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.54%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.79%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.78%, I= 4.99[A]	Regla_Dos, SoC = 65.64%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.52%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.79%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.76%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.62%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.51%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.78%, I= 0.71[A]
Regla_uno, SoC = 78.73%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.60%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.49%, I= 2.93[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.78%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.71%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.59%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.48%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.78%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.69%, I= 4.94[A]	Regla_Dos, SoC = 65.57%, I= 3.38[A]	Regla_Tres, SoC = 44.46%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.77%, I= 0.74[A]
Regla_uno, SoC = 78.66%, I= 4.94[A]		Regla_Tres, SoC = 44.45%, I= 2.90[A]	Regla_Cuatro, SoC = 11.77%, I= 0.71[A]

**Figura 25** Funcionamiento de algoritmo de control de reglas

Mediante la experimentación se comprueba que el algoritmo de control de cargas funciona, en conjunto con el algoritmo de estado de carga, ambos fueron implementados dentro de la plataforma Arduino, como se explicó en el capítulo 4. Además se realizó la toma de mediciones durante 3 horas con 40 minutos, que fue el tiempo que se consiguió hasta que las baterías se agotaron completamente. El funcionamiento de cada uno de las reglas al ponerse en activación se logra una medición diferente de corriente eléctrica,

ya que por cada regla de control existen elementos que se van desactivando. Durante esta fase se consideró calcular el tiempo adicional de duración de la batería con el modelo de porcentajes propuesto.

El cálculo inicial de duración total de la batería es de 2 horas y 20 minutos, pero una vez puesto en efecto el algoritmo de control de reglas se tiene una duración total de la batería de 3 horas 40 minutos y 7 segundos



**Figura 26** Tiempo inicial y final de duración de la batería del robot Dagú.

Se realiza un análisis del tiempo de duración una vez aplicado el algoritmo de control de cargas se obtiene como resultado un aumento del 57% de duración de batería con referencia a las 2 horas 20 minutos iniciales.

La siguiente tabla muestra los valores recopilados durante esta experimentación:

**Tabla 17**

*Tabla de análisis de consumo de corriente, intervalos de funcionamiento y duración de baterías.*

<b>Reglas de control</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Tiempo de activación para regla de control</b>	<b>Módulos</b>	<b>Consumo total de corriente</b>
<b>1ero</b>	Desactivación al 75%	34min	Módulo de sensado químico Cámara de sensado Bomba neumática Lm35	4947 mA
<b>2do</b>	Desactivación al 50%	1h 14min	Módulo de visión remota Ip Cámara	3370 mA
<b>3ro</b>	Desactivación al 13%	2h 35min	Módulo de movimiento Módulo de 4 Relés Driver Motor DC	2900 mA
<b>4to</b>	Desactivación al 11%	2h 51min	Módulo de navegación Sensores Ultrasónicos Brújula electrónica	759 mA
<b>5to</b>	Desactivación al 9%	3h 17min	Raspberry Pi 3	559 mA
	Modo de Bajo consumo al 9 %	3h 40min	Arduino DUE	409 mA

Durante la experimentación se comprueba que el algoritmo de control de reglas para desactivación de módulos es efectivo, se consideró que se logró aumentar la duración total de la batería a un total de 3 horas 40 minutos de funcionamiento. El robot Dagu tal y como se muestra en la propuesta de módulos estaría en condiciones para realizar lo siguiente:

- Se puede realizar como máximo un total de 10 ciclos de sensado con el módulo de sensado químico, con su respectivo análisis, teniendo una duración de 34 minutos hasta que la batería se encuentre al 75 %, obteniendo una velocidad de decrecimiento en el estado de carga de 0.17% cada segundo
- El módulo de visión remota puede brindar una imagen del video que detecte alrededor del robot, durante 1 hora 14 minutos hasta que el porcentaje de batería llegue al 50%.
- El módulo de movimiento ofrece una duración de 2 horas 35 minutos, dotándole de movilidad al robot hasta que la batería se encuentre al 13%. A partir de este punto el robot Dagu queda inmóvil, pero con la capacidad de enviar su ubicación a través de la brújula electrónica provista en el módulo de navegación, contando con una duración de 2 horas 51 minutos hasta llegar al 11 % del total de la batería.
- Por último la desactivación de la Raspberry Pi 3 se efectúa al llegar a 9% teniendo una duración de 3 horas y 17 minutos, para posteriormente apagarse a las 3 horas con 40 minutos, considerando que la plataforma Arduino se encontraba en modo de bajo consumo energético.



## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones:

- Se comprobó que mediante el sensado de corriente se puede estimar el estado de carga mediante el conteo de amperios hora de Coulomb, lo que permite tener una referencia del porcentaje de energía eléctrica almacenada restante en las baterías.
- Se realizó el diseño, acondicionamiento y montaje de los elementos del robot Dagu en forma de módulos de tal manera que cada uno cumpla su función de manera que no afecte su normal operación entre ellos.
- La estructura modular que se implementó en el robot, beneficia tanto al montaje y desmontaje de hardware adicional que se requiera al momento de realizar los diferentes tipos de experimentos a los que esté sujeto.
- Se implementó el módulo de baterías que además de proveer de energía eléctrica al robot, realiza el sensado de corriente.
- La ejecución de los algoritmos de medición de estado de carga, control de reglas, movimiento y comunicación con la tarjeta Raspberry Pi 3 se la realizó a través de sistemas operativos en tiempo real (RTOS) orientados a la plataforma Arduino.
- La programación basada en RTOS ofrece un mejor desempeño del procesador en función de las prioridades de ejecución, además ofrece un comportamiento determinista debido a que a cada tarea se le asigna una porción de pila de memoria,

además de ser un tipo de programación recomendado al momento de realizar una agrupación de múltiples tareas dentro de un microcontrolador.

- La medición de corriente para estimar el estado de carga se lo realizó con el sensor de corriente Acs-712 5[A], determinando un error relativo del 1.45 % durante la fase experimental.
- El algoritmo de control de cargas ofrece un aumento del 57 % de duración de batería LiPo que representa 1 hora 20 minutos, sabiendo que inicialmente se cuenta con 2 horas 20 minutos, logrando un total de 3 horas con 40 minutos.
- El tiempo total alcanzado de 3 horas 40 minutos permite establecer una comparación en 11 ciclos de trabajo para un can adestrado, sabiendo que el mismo puede únicamente trabajar durante 20 minutos, siendo un apoyo significativo en la detección de sustancias explosivas.
- El módulo de sensado químico actualmente está diseñado para realizar como máximo 10 ciclos de sensado, limitando esta función debido a que las bombas neumáticas poseen un consumo elevado de corriente eléctrica, provocando que la energía eléctrica restante de la batería comience a decrecer a razón de 0.17% cada segundo.
- Todo tipo de baterías que son sometidas a valores de profundidad de descarga del 80%, sufren algún tipo de daño, para tratar de reducir esto, se logró manejar un porcentaje de profundidad de descarga del 90%, con la cual las baterías podrían tener hasta un aproximado de 1200 ciclos de carga, todo esto debido a que se trató de compensar con una priorización en la autonomía de las baterías recargables.

- Se ha cumplido con todos los objetivos planteados puesto que a través de la implementación tanto de los algoritmos de estimación de estado de carga de las baterías y de control del encendido de módulos ha permitido la ejecución de la estrategia de control para la mejora en la autonomía de la duración en las baterías LiPo.

## **6.2. Recomendaciones:**

- Si se requiere de un mayor número de ciclos de trabajo en el módulo de sensado químico, se debe modificar el valor del intervalo de las reglas de manera que sea adaptable a las necesidades de la experimentación.
- Se recomienda seguir utilizando la programación basada en RTOS, debido a que ofrece mejores prestaciones en la ejecución de múltiples tareas.
- Para el cuidado de las baterías recargables LiPo se debe recordar no reducir más allá del 90% de la profundidad de descarga debido a que si se sobrepasaría ese valor, se lograría una avería irreparable al conjunto de baterías.
- Se recomienda seguir utilizando la estrategia de control implementada en el proyecto, debido a que cumple un papel muy importante en la gestión de recursos de energía eléctrica que proporciona la batería.
- Si se quisiera hallar un método más eficaz de estimación de estado de carga se recomienda utilizar método adaptativos como son los filtros de Kalman que poseen además de estimación una predicción de datos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alejandro, C., & Venegas, C. (2017). *Optimización e integración de una nariz electrónica autónoma embebida en un sistema robótico para la identificación de sustancias explosivas como tnt y pólvora base doble en ambientes controlados*. Quito.
- Arias Armijos, B. (2017). *Desarrollo e implementación de algoritmos de localización y fuentes de olor en un sistema robótico*. Quito.
- Barrientos Balager, A. (25 de 04 de 2018). *Fundamentos de Robótica*. Obtenido de Robotica Movil y aplicada: [www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dao/files/2012/04/Robotica-1.pdf](http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dao/files/2012/04/Robotica-1.pdf)
- Barry , R. (2016). *Mastering the FreeRTOS*. Michigan.
- Barth, M., Dy, J., Farrell, J., & Pang, S. (2001). *Battery state-of-charge estimation*. Berlin.
- Bayo, A. (2014). *Contador de amperios hora basado en Arduino*. Navarra: Universidad de Navarra.
- Berrueta Irigoyen, A. (2017). *Energy storage systems based on lithium-Ion batteries and supercapacitors*. Pamplona: UPna.
- Bianchi, E. (2011). *Elementos de electroquímica: electrolisis y acumuladores reversibles*. Santiago.
- Buchman, I. (2017). *Coulombic and Energy Efficiency with the Battery*. Cadex Electronics.
- Buonocunto, P. (2015). *Real time multitasking in Arduino*. Roma,Italia.
- Burgos Mellado, C. (2013). *Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman*. Santiago.
- Butazzo , G. (2011). *Hard real time computing systems*. New York.
- Butazzo, G. (2011). *Hard Real-Time Computing Systems*. New York.
- Chang, W.-Y. (2013). The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. *Hindawi Publishing Corporation*, 1-2.
- Chavez Gonzales , M. (2012). *Prototipo de robot móvil operado*. Querétaro.
- Chiasson, J., & Vairamohan, B. (2004). *Estimating the state of charge of battery*. IEEE on control systems technology.

- Chiasson, J., & Variamohan, B. (2006). *Estimating the State of Charge of a Battery*. Bangkok.
- Easybattery Norauto.Co. (24 de Julio de 2018). *Easy Battery*. Obtenido de Easybattery.es: <https://www.easybattery.es/blog-easy-battery/>
- Farag, S. M. (2013). *Modelling and State of Charge Estimation*. Ontario.
- Fasih, A. (2006). *Modeling and Fault Diagnosis of Automotive Lead-Acid Battery*. Ohio.
- Gholam-Abbas, N., & Pistoia, G. (2009). *Lithium Batteries: Science and Technology*. Springer.
- González-Longatt, F. M. (2006). *Circuit Based Battery Models: A Review*. Valencia.
- J., S. A., Fennie, C., Singh, P., & Atwater. (2009). Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. *Journal of Power Sources*, 293-300.
- Lawson, B. (21 de 04 de 2018). *State of Charge (SOC) Determination*. Obtenido de Woodbank Communications: <http://www.mpoweruk.com/SOC.htm>
- Mohamed Sayed, F. (2013). *Lithium - Ion State of charge Estimation*. Ontario.
- Muratori, M. (2009). *Thermal Characterization of Lithium-Ion*. Milan.
- NASA. (24 de 04 de 2018). *Nasa pagina oficial*. Obtenido de Satelites y exploraciones espaciales: [https://www.nasa.gov/connect/ebooks/aeronautics\\_ebooks\\_archive\\_1.html](https://www.nasa.gov/connect/ebooks/aeronautics_ebooks_archive_1.html)
- Pantano, N. (2016). *Arduino Real-Time Extension for programming Multitasking Application*. Pisa, Italia.
- Paracha, Z., & Doulai, P. (1998). Load Management. Techniques and Methods in Electric Power System. *IEEE Catalogue No: 98EX137*.
- Ramirez Rivera, R., & Reyes Perez, R. (2015). *Diseño e implementación de un robot autónomo móvil usando tecnología FPGA*. Guayaquil.
- Samolyk, M. M., & Sobczak, J. (2013). *Development of an algorithm for estimating Lead-Acid Battery State of charge and State of health*. Blekinge: Blekinge Institute of Technology.
- Silvestre, S., & Guasch, D. (2003). *Dynamic Battery Model for Photovoltaic Applications*. Barcelona: Semiconductor Devices Group of the Electronic Engineering Department.
- Sobczack, J., & Samoyalyk, M. (2013). *Development of an algorithm for a estimating Lead - Acid battery state of charge and state of health*. Blekinge.

- Team, M. E. (Diciembre de 2008). *MIT Electric Vehicle Online*. Obtenido de [http://mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf)
- Trinh, F. (2012). *A method of evaluating battery state of charge estimation accuracy*. Gothenburg.
- Viera Perez, J. (2003). *Carga rápida para baterías de gran capacidad, análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos*. Guijón.
- Watrin, A., Blunier, B., & Miraonui, A. (2012). *Review of adaptative systems for lituim batteries state of charge state of health estimation*. Michigan.
- Xiao, B., Shi, Y., & He, L. (2010). *A Universal State-of-Charge Algorithm for Batteries*. Los Angeles.
- Zabaleta, J., San Martin, I., & Pascual, J. (2016). *Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental*. Pamplona.