

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de un sistema de carga multiquímica
inteligente para los agentes robóticos Pololu 3Pi+**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Ángel Edgardo
Orellana Sutuc, estudiante de Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2023

Resumen

En la actualidad se observa el uso extendido de baterías recargables en sistemas portátiles, así como un incremento en la capacidad de almacenamiento de energía debido a la creación de nuevas tecnologías para baterías, como lo es el caso de las baterías de iones de litio (Li-ion). Las baterías con tecnología de níquel metalhidruro (NiMH) también son baterías con un uso extendido en la actualidad debido a su antigüedad, sin embargo, presentan una menor densidad energética en comparación con las batería Li-ion.

En el presente protocolo se hace una propuesta para aumentar la autonomía de los agentes robóticos Pololu 3Pi+ que son utilizados en el ecosistema Robotat en la Universidad del Valle de Guatemala. Para aumentar la autonomía de estos agentes robóticos se propone la adición de una batería Li-ion como fuente de respaldo para las baterías NiMH que posee actualmente. Con la adición de la batería de respaldo, también se propone la integración de un sistema de carga multiquímica para realizar la carga de ambas baterías junto con el desarrollo de estaciones de carga que se encontraran alrededor de la plataforma, de forma que los agentes robóticos puedan ir a recargar las baterías al momento que presenten un bajo nivel de carga.

Antecedentes

Robotat

En la Universidad del Valle de Guatemala se cuenta con el ecosistema Robotat descrito en [1], que consiste en un ecosistema formado por una red de comunicación WiFi, así como también un sistema de captura de movimiento OptiTrack, el cual emplea un total de seis cámaras. Adicionalmente Robotat cuenta con una antena inteligente la cual combina la información obtenida por medio del sistema de captura de movimiento, con información dada por una unidad de medición inercial de forma que es posible el intercambio de información entre agentes mediante comunicación inalámbrica.



Figura 1: Ecosistema Robotat [1]

Robotarium del *Georgia Institute of Technology*

El Robotarium es un proyecto diseñado por *Georgia Institute of Technology*, con la finalidad de tener una plataforma *multi-robot* que pueda ser accedida de forma remota y de fácil acceso al público.

Este proyecto es presentado en [2] como una herramienta de propósitos educacionales así como para aplicaciones de robótica avanzada. En el prototipo inicial del Robotarium, los agentes robóticos utilizados son GRITSBot que, para asegurar su autonomía se encontraban equipados con un sistema de carga inalámbrica, el cual tenía bobinas de inducción orientadas hacia el suelo de forma que los GRITSBot eran recargados por medio de transmisores instalados en el suelo. Sin embargo, este sistema contaba con la desventaja que para maximizar la eficiencia al cargar, era necesario que los transmisores y las bobinas instaladas en los agentes estuvieran lo más cerca posible. Debido a las técnicas de fabricación existía la posibilidad de que los robots montados se arrastraran en la superficie, o bien se encontrarían a una distancia que impidiera la carga.

Debido a los inconvenientes mencionados anteriormente el sistema de carga fue reemplazado por unidades de transmisión inalámbricas colocadas en los muros de la arena del Robotarium, así como también unidades receptoras instaladas en la parte trasera de los GRITSbot. Con este nuevo diseño las unidades de carga pueden ser manufacturadas de forma mas rápida, utilizando corte láser, y cargadores inalámbricos comerciales. Adicionalmente al estar los cargadores montados en el muro se tiene un proceso de carga más fiable al permitir un contacto casi directo con los robots, sin la necesidad de colocar los receptores cerca del suelo [2].



Figura 2: Arena del Robotarium [2]

Cargadores de baterías multiquímica

En la actualidad para muchas aplicaciones es de gran importancia el uso baterías para tener movilidad y autonomía, de igual forma también es indispensable el desarrollo de sistemas

mas de carga que sean eficientes. En [3] se presenta el desarrollo de un cargador programable multiquímica de baterías, el cual se encuentra basado en el circuito integrado MCP19111 de Microchip, que es un *Digitally-Enhanced Power Analog Controller*, este, a grandes rasgos es un controlador el cual contiene lazos de control analógicos con interfaces digitales para el monitoreo y manipulación de parámetros de forma que sea posible el ajuste del sistema mientras se encuentra en operación pudiendo mejorar el rendimiento significativamente.

En el *Massachusetts Institute of Technology* se desarrolló el sistema WafferSat el cual es un satélite que emplea sistemas microelectromecánicos para reducir su tamaño. En [4] se explica el uso del controlador de carga BQ25703A, manufacturado por Texas Instruments para el diseño de seguidor de máximo punto de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) el cual es empleado en el WafferSat para el sistema de carga solar de baterías de polímero de iones de litio (LiPo).

Estación de carga inalámbrica para UAV

En [5], se presenta el diseño de una estación de carga inalámbrica para UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado, por sus siglas en inglés). Este proyecto surge debido a que los multicópteros, en general, tienen una demanda alta de potencia, lo que limita su tiempo de vuelo, especialmente en el caso de aquellos de pequeñas dimensiones. Para lograr que estos multicópteros puedan operar durante períodos prolongados, resulta necesario recargar sus baterías, lo cual generalmente requiere intervención humana directa. En el desarrollo de esta plataforma de carga, se utilizó la placa DFRobot Leonardo, basada en el microcontrolador ATmega32u4, que incluye un conector XBee integrado para permitir la comunicación inalámbrica con módulos Zigbee. En cuanto a la transmisión de energía hacia el multicóptero, se empleó un sistema de carga inalámbrica, el cual fue prototipado utilizando placas perforadas. El sistema diseñado logró alcanzar una eficiencia máxima del 63.4 % [5].

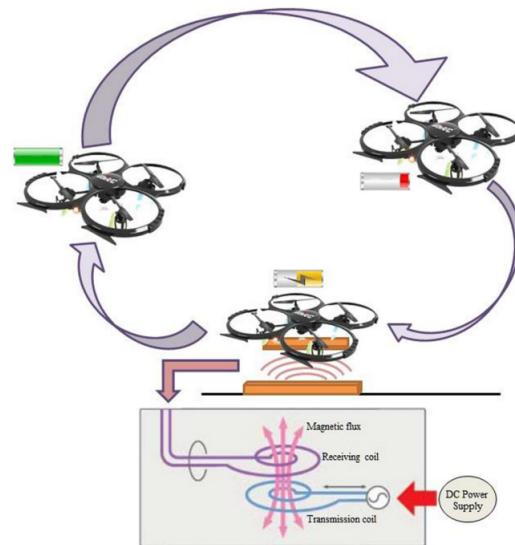


Figura 3: Concepto de la solución propuesta [5]

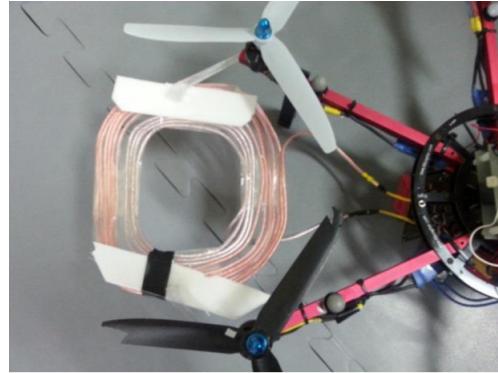


Figura 4: Hexacóptero junto con la bobina receptora [5]

Justificación

Para asegurar la autonomía de los agentes robóticos es necesario proporcionar un sistema de alimentación mediante el uso de baterías, para ello los agentes robóticos Pololu 3Pi+ tienen como fuente de energía cuatro celdas de baterías recargables NiMH en serie. Sin embargo, no presentan un sistema de carga incorporado debido a esto es necesaria la extracción de las mismas para su recarga. Implicando esto, la participación activa del operador para la recarga de las baterías, lo cual a su vez no es escalable al emplear una gran cantidad de agentes robóticos Pololu 3Pi+.

Este trabajo pretende llevar a un mayor grado la autonomía de los agentes Pololu 3Pi+ mediante la implementación de un sistema de carga multiquímica que permita la recarga del banco de baterías NiMH incorporado, sin la necesidad de su extracción. Adicionalmente, se incorpora una batería de respaldo LiON 18650 para aumentar su autonomía y que pueda ser empleada para la alimentación de módulos adicionales del agente robótico. Como parte del sistema de carga, también se diseñarán estaciones de carga magnéticas, de forma que cuando los agentes Pololu 3Pi+ presenten un bajo nivel de carga, estos puedan acudir a la estación más cercana para realizar la carga de ambas baterías.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar y manufacturar un sistema de carga multiquímica inteligente para los agentes robóticos Pololu 3Pi+.

Objetivos específicos

- Desarrollar y manufacturar una placa de expansión para los agentes robóticos Pololu 3Pi+, que contenga un módulo de carga multiquímica y manejo de potencia.
- Implementar un sistema de carga multiquímica que logre el manejo de un banco de baterías NiMH, así como una batería de respaldo adicional Li-ion 18650.

- Desarrollar e implementar un algoritmo de monitoreo y diagnóstico para el uso automático de la batería de respaldo y la carga automática del agente.
- Desarrollar el prototipo de la estación de carga para los agentes Pololu 3Pi+.

Marco teórico

Baterías de ion de litio (Li-ion)

Las baterías de ion de litio se utilizan ampliamente en sistemas portátiles, como vehículos eléctricos y computadoras portátiles. Su uso extendido se debe principalmente a su alta densidad energética, que oscila entre 100 y 265 Wh/Kg, o expresado en términos de densidad volumétrica, entre 250 y 670 Wh/L según se indica en [6]. Estas baterías tienen un rango de voltaje típico de 3 a 4.2 voltios, lo que implica que se requiere una menor cantidad de celdas para alcanzar voltajes más altos. Una celda presenta una larga vida, llegando a tener el 80 % de su capacidad luego de 500 ciclos de carga [7].

Las baterías Li-Ion presentan algunas desventajas, como su alta sensibilidad a la sobrecarga, sobredescarga, corrientes altas, sobrecalentamiento, entre otros factores. Debido a estas características, es necesario utilizar un circuito de protección, como un BMS (*Battery Management System*), para garantizar su funcionamiento seguro y prolongar su vida útil [7]. En la figura 5 se pueden observar baterías de iones de litio en diferentes formatos.



Figura 5: Baterías Li-ion [8]

Algoritmos de carga para baterías Li-ion

Para la carga de las baterías Li-ion, el método más conocido es el de corriente constante-voltaje constante (CC/VC), esto debido a la simplicidad y fácil implementación. Durante la primera etapa de este algoritmo, se aplica una corriente constante a la batería, hasta que el voltaje de esta alcance un valor preestablecido (V_{preset}), usualmente 4.2 voltios, luego se aplica un voltaje constante V_{preset} a la batería de forma que la corriente aplicada va reduciendo su valor hasta alcanzar un valor preestablecido, usualmente 0.1C, donde C es la capacidad de carga de la batería (en mAh), momento en el cual se considera finalizada la carga de la batería [9].

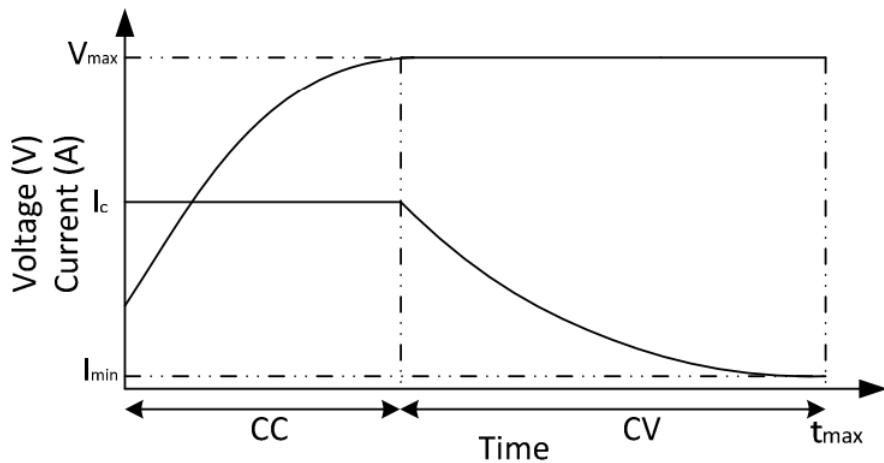


Figura 6: Perfil de carga para el algoritmo CC/VC [9]

Otro algoritmo para la carga de baterías Li-Ion es el denominado *Multistage current charging algorithm* (MSCC). En este algoritmo se propone el uso de distintos valores de corriente preestablecidos a los cuales se cargará la batería, usualmente el cambio entre cada nivel de corriente es establecido cuando el voltaje de carga alcanza un valor determinado (usualmente 4.2V) [9].

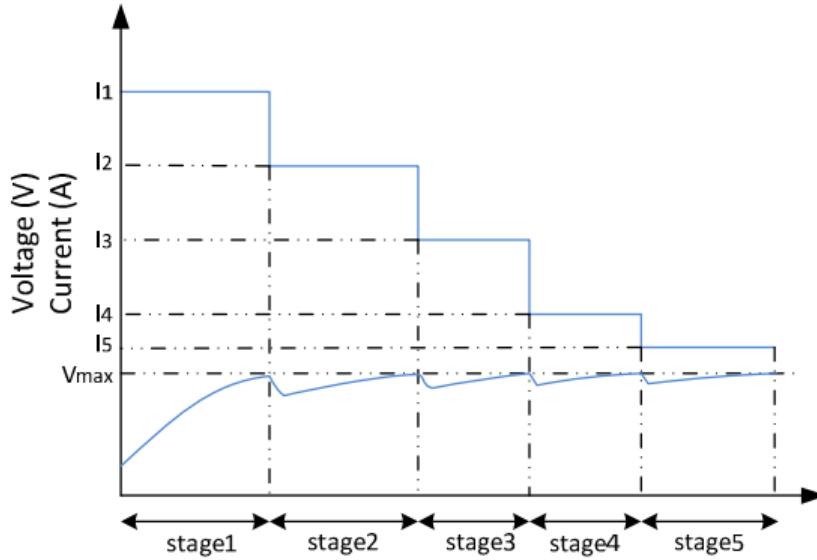


Figura 7: Perfil de carga para el algoritmo MSCC [9]

Baterías de Níquel metalhidruro (NiMH)

La química de las baterías NiMH cuentan con una tecnología consolidada y ampliamente adoptada. Este tipo de baterías tienen un menor costo comparado con las baterías basadas en litio. Los métodos de carga para este tipo de baterías son flexibles ofreciendo corrientes de carga superiores a 1C, o una carga con corrientes bajas, lo cual reduce la demanda de potencia hacia el sistema de alimentación, y simplificando el circuito de carga. Este tipo de baterías ofrecen altas corrientes de descarga debido a su baja impedancia interna. Una desventaja de estas baterías es su voltaje nominal el cual es de 1.2V, por lo que en aplicaciones típicas se requiere el uso de 3 o 4 celdas en serie [7]. La densidad energética de este tipo de baterías se encuentra en el rango de 40-60 Wh/Kg [10]. En la figura 8 se muestran dos baterías NiMH en formato AA.



Figura 8: Batería NiMH [11]

Algoritmos de carga para baterías NiMH

El algoritmo de cambio de voltaje negativo (*negative delta voltage method*) es un método de carga empleado en las baterías NiMH que consiste en aplicar una corriente de carga constante a la batería, mientras se monitorea el voltaje de la misma. Para determinar cuando la batería se encuentra totalmente cargada se usa la detección de una caída de voltaje en la misma. Sin embargo, este método no es el más recomendado, puesto que la reacción química que se presenta al momento de la carga de batería es exotérmico, por lo que al momento de presentar esta caída de voltaje se puede presentar un aumento excesivo en la temperatura. Otra característica que hace difícil la implementación de este algoritmo, es el hecho de que algunos tipos de baterías NiMH no presentan una caída significativa de voltaje al momento de alcanzar su capacidad máxima de carga [12].

Un segundo método de carga consiste en aplicar una corriente de carga constante y detectar el punto de inflexión (punto en el que ya no existe cambio en el voltaje de la batería) en la curva de tensión para finalizar el proceso de carga. Esto ayuda a prevenir un sobrecalentamiento excesivo de la batería, lo que a su vez contribuye significativamente a prolongar su vida útil. Para la detección del punto de inflexión es necesaria la primera derivada del voltaje de la batería con respecto al tiempo, en la práctica esta es aproximada mediante la medición en tiempo real [12].

Convertidores comutados

En el campo de la electrónica de potencia, el principal elemento que es esencial es el convertidor comutado, el cual en general consta de un puerto de potencia de entrada, un puerto de potencia de salida, así como una señal de control, un modelo de convertidor comutado se puede observar en la figura 9. La potencia de entrada es procesada con base en la señal de control del convertidor, produciendo una potencia de salida. Un tipo de convertidor

comúnmente utilizado es el convertidor DC-DC, en el cual un voltaje constante de entrada es convertido a un voltaje constante de salida que tiene una magnitud menor o mayor, y en algunos casos con polaridad opuesta. Adicionalmente la entrada del convertidor puede o no estar aislada eléctricamente de la salida. Los convertidores comutados son ampliamente usados debido a su alta eficiencia, puesto que, teóricamente tienen una eficiencia del 100 % a diferencia de los reguladores lineales [13].

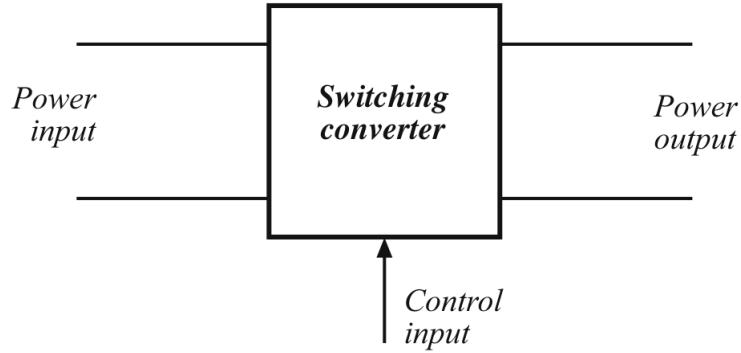


Figura 9: Modelo general de un convertidor comutado [13]

Otra parte esencial para un convertidor comutado es el controlador, esto ya que siempre es requerida un voltaje de salida que se encuentre bien regulado, aun si existen variaciones en el voltaje de entrada o en la corriente requerida por la carga [13]. En la figura 10 se presenta la topología general para un convertidor comutado al incluir el controlador.

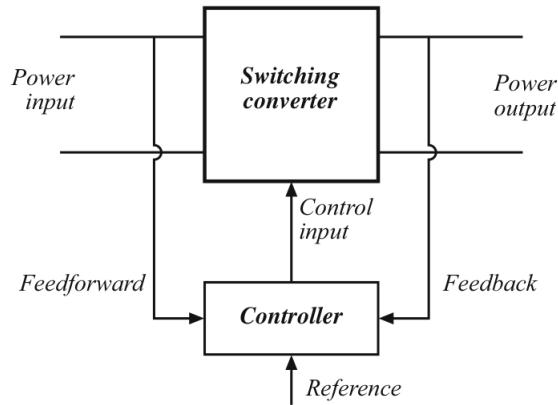


Figura 10: Topología general de un convertidor comutado junto con su controlador [13]

Los convertidores comutados DC-DC operan bajo dos principios el balance voltios-segundo en el inductor y el balance en la carga del capacitor, los cuales son explicados a continuación [13].

Balance voltios-segundo en el inductor

Este principio expresa que el cambio neto en la corriente del inductor durante un periodo de conmutación debe ser igual a 0, debido a que en un convertidor conmutado la corriente promedio de un inductor no debe de cambiar. Dado que la relación voltaje-corriente en un inductor está dada por

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

donde i_L es la corriente en el inductor, v_L es el voltaje en el inductor y L la inductancia, al integrar 1 durante un periodo de conmutación se tiene

$$i_L(T_s) - i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt \quad (2)$$

donde T_s es el periodo de conmutación. En la ecuación 2, el lado derecho de la igualdad representa el cambio neto durante un periodo de conmutación, el cual debe ser igual a 0, teniendo como resultado

$$\int_0^{T_s} v_L(t) dt = 0 \quad (3)$$

este resultado es importante para el análisis de convertidores DC-DC conmutados [13].

Balance en la carga del capacitor

Este principio expresa que el cambio neto de la corriente en el capacitor durante un periodo de conmutación es igual a 0. Por argumentos similares a los dados en la sección anterior se llega a la ecuación mostrada en 4 [13].

$$\int_0^{T_s} i_C(t) dt = 0 \quad (4)$$

Convertidor reductor (*buck converter*)

El convertidor reductor, como su nombre lo indica, lleva a cabo la función de disminuir el voltaje de entrada (V_g , en la figura 11). Mediante el uso del principio del balance voltios-segundo en el inductor , el balance en la carga del capacitor, y adicionalmente empleando la aproximación de rizado pequeño (aproximación en la cual todos los voltajes y corrientes en los elementos de un circuito se consideran constantes), se obtiene que la relación entre el voltaje de entrada y el de salida está dado por $v(t) = DV_g$, donde D es el ciclo de trabajo, que es la fracción de tiempo en la que el interruptor se encuentra en la posición 1 (ver figura 11) con respecto al periodo de conmutación [13].

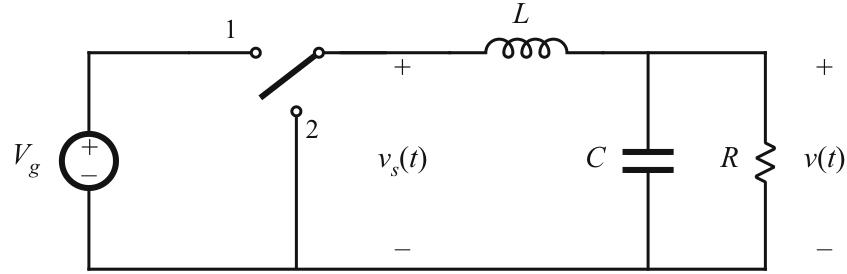


Figura 11: Convertidor reductor con elementos ideales [13]

Multiplexores de potencia

Un multiplexor de potencia, es un conjunto de conmutadores electrónicos que son utilizados para seleccionar entre dos o más entradas de potencia, hacia una única salida. El uso de multiplexores de potencia le brinda la flexibilidad a un sistema de poder seleccionar entre diferentes tipos de entradas de potencia [14]. En la figura 12 se muestra el diagrama de bloques de un multiplexor de potencia.

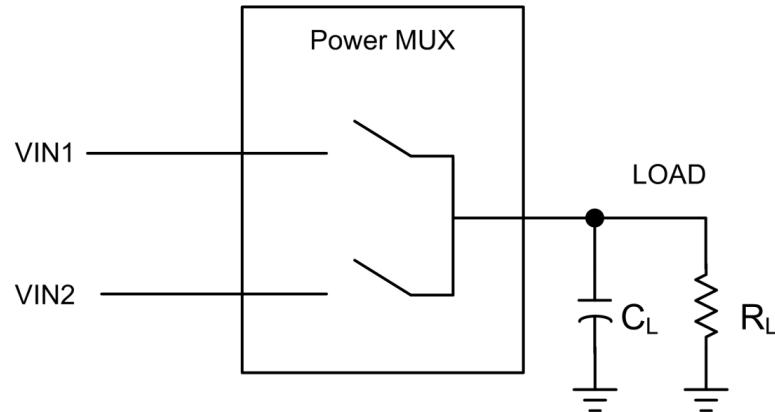


Figura 12: Diagrama de bloques de un multiplexor de potencia [14]

En el caso de que no exista preferencia para alguna de las alimentaciones de entrada, o inclusive si siempre se prefiere el uso del voltaje de entrada más alto, el requerimiento mínimo para un multiplexor de potencia es el bloqueo de corriente inversa. Este requerimiento puede ser cumplido mediante el uso de diodos o circuitos integrados que se comporten como diodos [14]. Como se muestra en la figura 13.

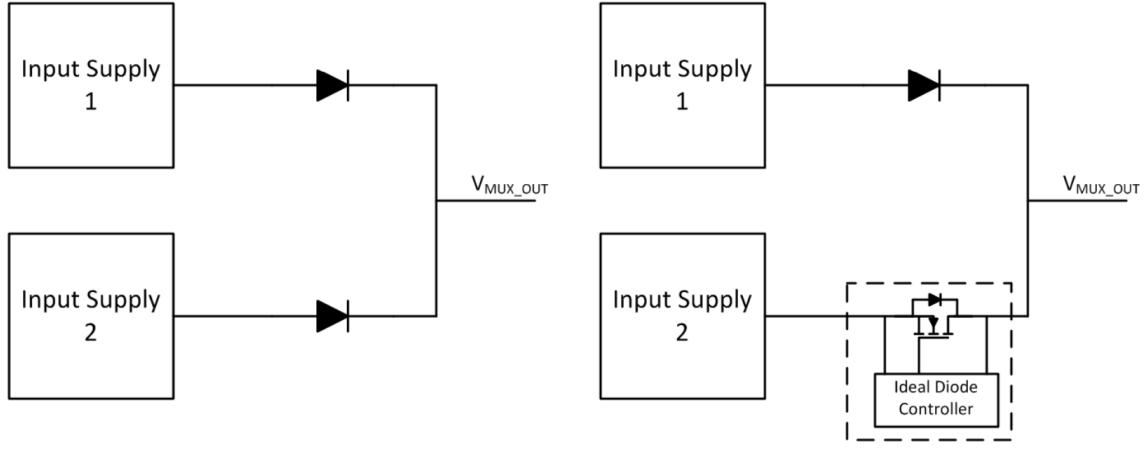


Figura 13: Sistema mínimo para un multiplexor de potencia [14]

En el caso de que exista alguna prioridad para los voltajes de entrada, es necesario agregar conmutadores, por ejemplo un transistor MOSFET, para tener un control total sobre la ruta que será habilitada. Al igual que en el caso sin prioridad, el bloqueo ante corrientes inversas debe seguir presente [14]. En la figura 14 se muestra un ejemplo de multiplexor de potencia con prioridad.

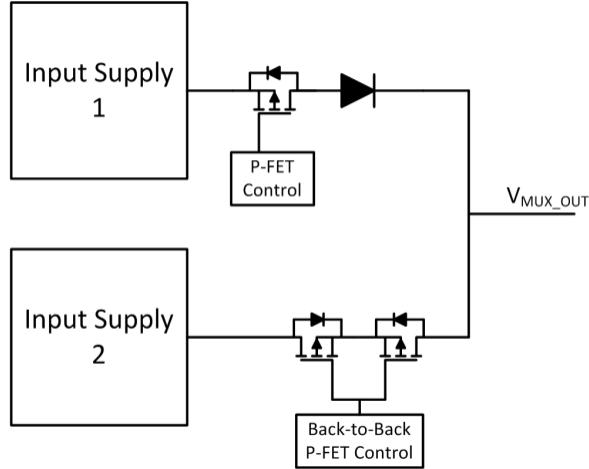


Figura 14: Multiplexor de potencia con prioridad [14]

Para el control de multiplexores de potencia, se tienen dos opciones: manual o automático. Un multiplexor de potencia manual es aquel en el cual cada fuente de alimentación es seleccionada mediante señales externas. Por el contrario, un multiplexor automático es aquel que no requiere señales externas para el cambio entre una fuente de alimentación y otra, en este tipo de control usualmente existe una entrada de potencia que tiene la prioridad 14.

Pololu 3Pi+

El Pololu 3Pi+ es un robot, programable por el usuario. Este se encuentra basado en el microcontrolador ATmega32U4 AVR de microchip, el microcontrolador incorporado se encuentra preprogramado con un gestor de arranque que es compatible Con la plataforma Arduino. Incluye dos puentes H para el control de los motores así como distintos sensores, como lo son *encoders* de cuadratura, así como una unidad de medición inercial [15]. En cuanto al sistema de potencia tiene como principal fuente de energía el uso de cuatro celdas AAA en serie, en donde el terminal negativo se encuentra conectado a GND mientras que el terminal positivo, al pin denominado VBAT (ver figura 15).

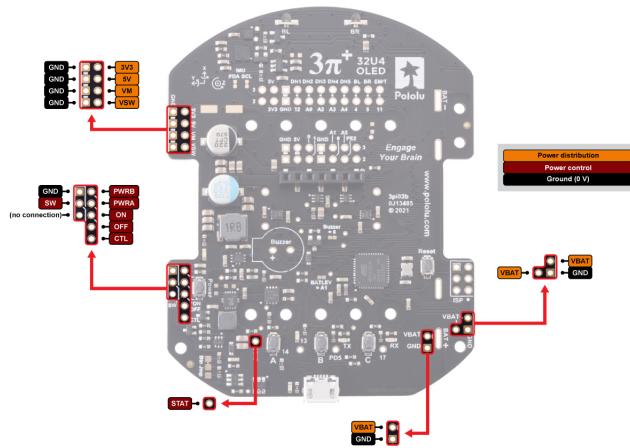


Figura 15: Distribución de los pines de potencia el Pi3+ [15]

Para la alimentación de los motores, el Pi3+ posee un convertidor comutado, para proveer de 8 voltios a los motores de forma que no se presente una caída en la velocidad de los motores debido a la descarga gradual de las baterías, adicionalmente, se tiene un segundo regular comutado que provee 5 voltios, aunque esta no es accesible de forma directa para el usuario. También posee un regulador lineal (LDO por sus siglas en inglés). El voltaje de entrada (el cual es utilizado para generar los 8, 5 y 3.3 voltios de la placa) es seleccionado mediante un multiplexor de potencia, más específicamente se emplea el circuito integrado (IC) TPS2113A fabricado por Texas Instruments [15].

Metodología

Investigación preliminar

Lo primero a realizar para este proyecto es una Investigación sobre distintos métodos de carga tanto para baterías Li-ion así como para baterías NiMH. Adicionalmente se investigarán circuitos integrados que cumplan estas funciones así como circuitos discretos, es decir circuitos que no se encuentran integrados en un encapsulado, para la carga de las baterías. Así también, se realizará una investigación sobre la construcción de multiplexores de potencia, tanto con circuitos integrados existentes como con componentes discretos.

Simulación del circuito para la carga de baterías Li-ion y NiMH

Para este paso, luego de haber seleccionado los circuitos para la carga de baterías Li-ion y NiMH, se realizará su simulación para determinar distintos parámetros, como lo es la potencia consumida por cada componente, su corriente y voltaje entre otros. Esto para poder dimensionar de forma correcta cada componente al momento de realizar el diseño del circuito impreso(PCB).

Prototipado de los circuitos para la carga de baterías

Se realizará el diseño y manufactura del circuito impreso para cada uno de los circuitos de carga, de forma independiente uno del otro, para luego comprobar su correcto funcionamiento así como determinar el tiempo de carga de cada batería.

Simulación del multiplexor de potencia

Se realizará la simulación del circuito seleccionado para realizar la función de multiplexado para la selección de la fuente de alimentación (batería Li-ion o NiMH) para el Pololu 3Pi+. También se verificará su comportamiento tanto en estado estacionario como de su comportamiento en el régimen transitorio.

Prototipado del multiplexor de potencia

Para este paso se llevará a cabo el diseño y manufactura del circuito impreso para el multiplexor de potencia, verificando su comportamiento con relación a la simulación. Se realizarán mediciones para verificar que el comportamiento en el régimen transitorio sea el adecuado para proveer potencia de forma ininterrumpida al agente robótico Pololu 3Pi+.

Integración de los circuitos diseñados

Se realizará la integración de los circuitos diseñados previamente en un único circuito impreso, para luego verificar que cada uno funcione de forma correcta cada uno, así como también su operación en conjunto. Se verificará que sea posible la carga de las dos baterías al mismo tiempo mientras se emplea la fuente de alimentación externa para el suministro de potencia del Pololu 3Pi+.

Implementación del algoritmo para detección de carga en las baterías

Se procederá a implementar un algoritmo para determinar el estado de carga de baterías, de forma que en el momento en el cual una de las dos baterías tenga un estado de carga bajo, se cambie a la batería de respaldo, o en caso de que ambas se encuentren con un estado

de carga bajo, iniciar el proceso para que el agente robótico Pololu 3Pi+ se dirija hacia su estación de carga.

Desarrollo del prototipo para la estación de carga

Como ultima actividad se realizará el desarrollo del prototipo para la estación de carga. Este desarrollo comprenderá tanto la estructura física para la estación como el *hardware* para poder proveer de potencia al sistema de carga multiquímica así como para detectar que la estación se encuentra en uso.

Cronograma de actividades

	03/07/2023	10/07/2023	17/07/2023	24/07/2023	31/07/2023	01/08/2023	07/08/2023	14/08/2023	21/08/2023	28/08/2023	01/09/2023	04/09/2023	11/09/2023	18/09/2023	25/09/2023
	julio														
Investigación preliminar															
Simulación: circuito de carga (Li-ion)															
Simulación: circuito de carga (NiMH)															
Diseño PCB: circuito de carga (Li-ion)															
Diseño PCB: circuito de carga (NiMH)															
Prueba del circuito de carga (Li-ion)															
Prueba del circuito de carga (NiMH)															
Simulación: multiplexor de potencia															
Diseño PCB: multiplexor de potencia															
Prueba del multiplexor de potencia															
Integración de los circuitos diseñados															
Implementación de algoritmo															
Desarrollo de la estación de carga															
Elaboración de documento escrito															

Índice preliminar

1. Resumen
2. Abstract
3. Introducción
4. Antecedentes
 - 4.1. Robotat

- 4.2. Robotarium del Georgia Institute of Technology
- 4.3. Cargadores de baterías multiquímica
- 4.4. Estación de carga inalámbrica para UAV
5. Justificación
6. Objetivos
 - 6.1. Objetivo general
 - 6.2. Objetivos específicos
7. Marco teórico
 - 7.1. Baterías de ion de litio (Li-ion)
 - 7.7.1. Algoritmos de carga para baterías Li-ion
 - 7.2. Baterías de Níquel metalhidruro (NiMH)
 - 7.7.2. Algoritmos de carga para baterías NiMH
 - 7.3. Convertidores conmutados
 - 7.7.3. Balance voltios-segundo en el inductor
 - 7.7.3. Balance en la carga del capacitor
 - 7.7.3. Convertidor reductor (*buck converter*)
 - 7.4. Multiplexores de potencia
 - 7.5. Pololu 3Pi+
8. Diseño del sistema de carga multiquímica
 - 8.1. Simulación del cargador para batería Li-ion
 - 8.2. Simulación del cargador para batería NiMH
 - 8.3. Simulación del Multiplexor de potencia
9. Evaluación del sistema de carga multiquímica
10. Diseño de la estación de carga
11. Evaluación de la estación de carga
12. Conclusiones y recomendaciones
13. Bibliografía
14. Anexos

Referencias

- [1] C. Perafán Montoya, «Robotat: un ecosistema robótico de captura de movimiento y comunicación inalámbrica.,» 2022. dirección: <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/handle/123456789/4250> (visitado 15-04-2023).
- [2] S. Wilson, P. Glotfelter, S. Mayya et al., «The Robotarium: Automation of a Remotely Accessible, Multi-Robot Testbed,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, n.º 2, págs. 2922-2929, abr. de 2021, Conference Name: IEEE Robotics and Automation Letters, ISSN: 2377-3766. DOI: 10.1109/LRA.2021.3062796.
- [3] T. L. Cleveland y C.-C. L. Train, «Developing programmable multi-chemistry battery chargers for common power electronic topologies using a hybrid PWM controller,» en *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, nov. de 2015, págs. 1-7. DOI: 10.1109/IFEEC.2015.7361409.
- [4] X. A. Zapien, «Electrical system design for wafer-like satellite,» Accepted: 2020-09-15T22:03:08Z, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2020. dirección: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/127549> (visitado 22-04-2023).
- [5] A. B. Junaid, Y. Lee e Y. Kim, «Design and implementation of autonomous wireless charging station for rotary-wing UAVs,» *Aerospace Science and Technology*, vol. 54, págs. 253-266, 1 de jul. de 2016, ISSN: 1270-9638. DOI: 10.1016/j.ast.2016.04.023. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963816301547> (visitado 08-05-2023).
- [6] «Lithium-ion battery,» Clean Energy Institute. (2020), dirección: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/> (visitado 18-05-2023).
- [7] T. Instruments, «Multi-chemistry charger in low battery power applications,» 2022. dirección: www.ti.com/lit/an/sluaah5/sluaah5.pdf.
- [8] Mk2010, *English: Two 18650 lithium-ion batteries*, 16 de nov. de 2012. dirección: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:18650_Li-ion_%26_Panasonic_CR123A_20121116.jpg (visitado 12-05-2023).
- [9] W. Shen, T. T. Vo y A. Kapoor, «Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview,» en *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, ISSN: 2158-2297, jul. de 2012, págs. 1567-1572. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6360973.
- [10] F. Zhan, L. J. Jiang, B. R. Wu, Z. H. Xia, X. Y. Wei y G. R. Qin, «Characteristics of ni/MH power batteries and its application to electric vehicles,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 293-295, págs. 804-808, 20 de dic. de 1999, ISSN: 0925-8388. DOI: 10.1016/S0925-8388(99)00361-8. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838899003618> (visitado 20-05-2023).
- [11] Multicherry, *English: Rear of a NiMH rechargeable battery. Sold on the UK market circa 2005 to 2010. (This is an Energizer, but no branding or references to it is visible in this photograph.)* 14 de ene. de 2020. dirección: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NiMH_rechargeable_AA_battery_\(no_visible_branding\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NiMH_rechargeable_AA_battery_(no_visible_branding).jpg) (visitado 22-05-2023).

- [12] J. Nicolai y L. Wuidart, «From nickel-cadmium to nickel-hybride fast battery charger,» 21 de mar. de 1995, 786-791 vol.2, ISBN: 978-0-7803-2423-7. DOI: 10.1109/PEDS.1995.404970.
- [13] R. W. Erickson y D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Cham, 2020, 1103 págs., ISBN: 978-3-030-43879-1.
- [14] A. Triano, «Basics of Power MUX,» Texas Instruments, 2020. dirección: <https://www.ti.com/lit/an/slvae51a/slvae51a.pdf> (visitado 20-05-2023).
- [15] Pololu. «Pololu 3pi+ 32u4 user's guide.» (), dirección: <https://www.pololu.com/docs/0J83/all> (visitado 15-05-2023).