

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

“Construcción y simulación térmica de un banco de baterías de pruebas de 12V 20Ah”.

Sebastián Echeverría Jarrín

Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 11 de diciembre de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO INTEGRACIÓN CURRICULAR**

“Construcción y simulación térmica de un banco de baterías de pruebas de 12V 20 Ah”.

Sebastián Echeverría Jarrín

Calificación:

/

Nombre del profesor, Título académico

Juan Sebastián Proaño, Ph.D.

Carlos Andrade, Ing.

Marco León, M.Sc.

Firma de los profesores

Quito, 11 de diciembre de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Sebastián Echeverría Jarrín

Código: 00116976

Cédula de Identidad: 1724183890

Lugar y fecha: Quito, 11 de diciembre de 2019

Resumen

En la actualidad, existen muchos proyectos que tratan de ser lo más limpios y menos contaminantes posibles. Esto se da debido a que las empresas y otros grupos se enfocan en trabajar con motores eléctricos, al ser estos menos contaminantes que los motores de combustión y además de las ventajas en la eficiencia que los motores eléctricos presentan. Un elemento muy importante de los sistemas eléctricos son las baterías; encargadas del almacenamiento de la energía. Al ser las baterías un componente clave estas requieren de un control y cuidado meticuloso que garanticen un funcionamiento óptimo y así poder sacarles el máximo provecho.

Las baterías son dispositivos que almacenan y entregan energía cuando se lo requiere. Debido a que algunos motores necesitan, no solo de una, sino de varios arreglos de baterías o celdas es que se dan los paquetes de baterías. Esto involucra una inversión alta al momento de adquirir un gran número. Es también por eso que con más razón un paquete de baterías debe contar con un sistema de seguridad que cuide la integridad de estas y así poder obtener su máximo potencial durante su tiempo de vida.

Debido a la razón previamente indicada, se busca la construcción de un prototipo de un pequeño paquete de baterías de pruebas que cuente con un sistema de administración o por sus siglas en inglés (Battery Management System; BMS). Adicionalmente se realizará una simulación para analizar la refrigeración y transferencia de calor de estos elementos al darse convección forzada. Al ser componentes que almacenan energía, cierta parte de ésta se convierte en calor y si no es controlado de manera adecuada, el aumento de temperatura al momento de cargarlas puede influenciar en su desempeño y así disminuir su vida útil.

Los resultados de este proyecto fueron favorables ya que se pudo obtener un prototipo funcional en el cual las celdas 18650 de litio cumplieron con su propósito, se obtuvo una buena refrigeración de estas, seguridad adicional por la presencia del BMS y se consiguió un prototipo liviano que no afecta negativamente la adición de estos elementos al proyecto de migración de un motor de combustión a uno eléctrico de la podadora. Adicionalmente, para el trabajo futuro se puede considerar la reducción de limitaciones, como la de conseguir tiras de níquel para unir las celdas y la adquisición de nuevas para garantizar su funcionamiento.

Palabras clave: Baterías, Almacenamiento de energía, refrigeración, eficiencia energética, transferencia de calor, BMS.

Abstract

Nowadays, there are many projects that try to be as clean and less polluting as possible. This is because companies and other groups focus on working with electric motors, as these are less polluting than combustion engines and in addition to the efficiency advantages that electric motors present. A very important element of electrical systems is batteries, responsible for energy storage. Since batteries are a key component, they require meticulous control and care to ensure optimum operation and thus be able to get the most out of them.

Batteries are devices that store and deliver energy when required. Because some engines need, not just one, but several arrangements of batteries or cells is that battery packs are produced. This involves a high investment when acquiring a large number. That is also why with more reason a battery pack must have a security system that takes care of their integrity and thus be able to obtain their maximum potential during their lifetime.

Due to the previously stated reason, it is wanted that the construction of a prototype of a small test battery pack that has an administration system or by its acronym in English (Battery Management System; BMS). Additionally, a simulation will be carried out to analyze the cooling and heat transfer of these elements when forced convection occurs. Being components that store energy, a certain part of the energy is converted into heat and if it is not controlled properly, the increase in temperature at the time of charging can influence its performance and thus decrease its useful life.

The results of this project were favorable since it was possible to obtain a functional prototype in which the 18650 lithium cells fulfilled their purpose, a good cooling of these was obtained, additional security due to the presence of the BMS and a lightweight prototype was achieved that It does not adversely affect the addition of these elements to the project of migration of a combustion engine to an electric one of the mower. Additionally, for the future work it can be considered for decreasing the limitations that were present during this project, such as acquiring the correct nickel strip for joining the cells and buying new ones to guarantee their functionality.

Keywords: Batteries, Energy storage, refrigeration, energy efficiency, heat transfer, BMS.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Derechos de Autor | 3 |
| Resumen | 4 |
| Abstract | 5 |
| Índice de Tablas | 8 |
| Índice de Figuras | 9 |
| Desarrollo del Tema | 14 |
| 1. Marco Teórico | 14 |
| 1.1 Baterías..... | 14 |
| 1.1.1 Principios de una batería | 14 |
| 1.1.2 Capacidad y descarga de una batería..... | 15 |
| 1.1.3 Bancos de baterías (Configuración serie y paralelo)..... | 15 |
| 1.2 Transferencia de calor por convección forzada..... | 16 |
| 2. Metodología | 17 |
| 2.1 Evaluación de concepto y selección..... | 17 |
| 2.2 Flujo de procesos..... | 18 |
| 2.3 Terminología Importante..... | 19 |
| 2.4 Materiales y selección de componentes | 20 |
| 2.5 Requerimientos del cliente | 21 |
| 2.6 Recolección y selección de baterías | 21 |
| Resultados y Discusión | 24 |
| 3. Reporte de Diseño | 24 |
| 4. Modelado y Prototipo..... | 24 |
| 5. Simulaciones | 33 |
| 6. Cálculo de transferencia de calor | 40 |
| 7. Dimensionamiento para podadora Sears Craftsman LT1036 | 42 |
| 8. Cálculo de potencias..... | 45 |
| 9. Pruebas | 50 |
| 9.1 Voltaje Final del prototipo de banco de baterías..... | 50 |
| 9.2 Pruebas de temperatura | 50 |
| Conclusiones | 56 |
| Referencias Bibliográficas | 59 |
| Anéxos | 62 |

| | | |
|-----|--|----|
| A. | Análisis de Riesgo..... | 62 |
| A.1 | Tabla de riesgos..... | 62 |
| A.2 | Tabla cualitativa de riesgos..... | 62 |
| A.3 | Tabla cuantitativa de riesgos..... | 62 |
| B. | Informes Térmicos FLIR..... | 63 |
| B.1 | Informe 1..... | 63 |
| B.2 | Informe 2..... | 64 |
| B.3 | Informe 3..... | 65 |
| B.4 | Informe 4..... | 66 |
| B.5 | Informe 5..... | 67 |
| C. | Posibles modelos para Inversor y Variador de Frecuencia..... | 68 |
| C.1 | Inversor Tripp-Lite 12VDC-230V AC..... | 68 |
| C.2 | Variador de frecuencia 230VAC 1-Phase Input 230 VAC 3-Phase Output | 70 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tabla de evaluación y selección del tipo de batería. | 17 |
| Tabla 2. Características de celdas 18650..... | 20 |
| Tabla 3. Características del BMS | 20 |
| Tabla 4. Requerimiento de diseño. | 21 |
| Tabla 5. Especificaciones de motor Siemens. | 43 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Baterías del bote Tapiatpia. (Kara Solar, 2019). | 13 |
| Figura 2. Componentes típicos en varios modelos de baterías. (Dunlop, J. 2010). | 14 |
| Figura 3. Desarrollo de la capa límite en transferencia de calor por convección. (Incropera, F. et al. 2011). | 16 |
| Figura 4. Convección forzada. (Incropera, F. et al. 2011). | 17 |
| Figura 5. Diagrama de flujo de procesos. | 18 |
| Figura 6. Batería de laptop. | 21 |
| Figura 7. Celdas 18650 dentro de la batería de laptop. | 22 |
| Figura 8. Prueba de una de las baterías 18650. (Lectura de voltaje en el multímetro: 3.6V). | 22 |
| Figura 9. Batería en el proceso de carga. | 23 |
| Figura 10. Diagrama eléctrico de baterías. | 24 |
| Figura 11. Modelado del prototipo. | 25 |
| Figura 12. Desglose de los componentes del prototipo del banco de prueba. | 25 |
| Figura 13. Cautín de soldadura tipo pistola y tipo lápiz. | 26 |
| Figura 14. Estaño y pomada para soldar. | 26 |
| Figura 15. Proceso de estañado en cable para soldar en los terminales de la celda. | 27 |
| Figura 16. Soldadura en la parte superior de las celdas. | 27 |
| Figura 17. Medición del voltaje del paquete de baterías. | 28 |
| Figura 18. Prototipo de paquete de baterías finalizado. | 28 |
| Figura 19. Diagrama de conexiones del paquete de celdas. | 29 |
| Figura 20. Diagrama de conexiones para BMS. | 29 |
| Figura 21. Conexión del paquete de baterías con el BMS. | 30 |
| Figura 22. Conexiones en el circuito del BMS. | 30 |
| Figura 23. Caja en estado inicial. | 31 |
| Figura 24. Perforadoras o sacabocados utilizados. | 31 |
| Figura 25. Uso del sacabocados para realizar el agujero de salida. | 32 |
| Figura 26. Caja exterior pintada y con montaje de ventilador. | 32 |
| Figura 27. Prototipo final y caja con diagramas de conexión y tabla de características. | 33 |
| Figura 28. Peso del prototipo final. (Lectura de la balanza 6.6 lb) | 33 |
| Figura 29. Simulación de SimScale de paquete 4x4 de baterías 18650. (Xua00988; SimScale). | 34 |
| Figura 30. Parámetros de condiciones iniciales de velocidad y temperatura. | 35 |
| Figura 31. Selección del fluido para la simulación. | 35 |
| Figura 32. Selección de tipo de análisis. | 36 |
| Figura 33. Configuración para el tipo de mallado. | 36 |
| Figura 34. Materiales para la simulación. | 37 |
| Figura 35. Simulación de trayectoria de flujo de aire. | 37 |
| Figura 36. Simulación de trayectoria de flujo de aire. | 38 |
| Figura 37. Simulación del flujo de calor de las celdas. | 38 |
| Figura 38. Simulación de enfriamiento de celdas por aire dentro del volumen de control. | 39 |
| Figura 39. Arreglo de tubos. (a) Alineada. (b) Escalonada. (Incropera; 2011). | 40 |
| Figura 40. Gráfico de triángulo de potencias y factor de potencia. (MyG Inc.). | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 41. Diagrama de conexiones para motor monofásico (Caso ideal)..... | 44 |
| Figura 42. Gráfico de corriente vs tiempo..... | 45 |
| Figura 43. Triángulo de potencias resultantes..... | 46 |
| Figura 44. Tres fases de voltaje con desfase de 120 grados. (Giancolli, 2009). | 46 |
| Figura 45. Diagrama de conexiones para motor trifásico..... | 47 |
| Figura 46. Lectura de voltaje del prototipo. (15.25 V)..... | 50 |
| Figura 47. Fuente BK Precision. | 51 |
| Figura 48. Imagen térmica en estado inicial..... | 51 |
| Figura 49. Imagen térmica después de 1min 30seg..... | 52 |
| Figura 50. Imagen térmica en vista superior. | 52 |
| Figura 51. Imagen térmica después de 5 min. | 53 |
| Figura 52. Imagen térmica después de 15 min. | 53 |
| Figura 53. Imagen térmica después de 20 min. | 54 |
| Figura 54. Imagen térmica después de 33 min. | 54 |
| Figura 55. Imagen térmica del BMS. | 55 |

Introducción

La Universidad San Francisco de Quito es uno de los tantos grupos enfocados en desarrollar proyectos sostenibles, limpios y amigables con el ambiente. Dentro del colegio politécnico y de la rama de ingeniería mecánica existen algunos proyectos que buscan ser desarrollados con la utilización de tecnología moderna que existe en la actualidad. Al igual que en muchos otros sectores, dichos proyectos buscan trabajar con energía eléctrica, al ser esta drásticamente más eficiente y con menor huella de carbono. Estos proyectos buscan presentar prototipos de máquinas que trabajen cien por ciento de forma eléctricas o híbridas. Dos de los proyectos que se están realizando en la actualidad son el de la transformación de una podadora de combustión a una podadora completamente eléctrica y el proyecto de la mejora y modificación de botes eléctricos de la ONG Kara Solar, que justamente es un grupo aliado de la Universidad que busca el trabajo en conjunto tanto de estudiantes como de profesores. En este último caso, la importancia de utilizar medios de transporte menos contaminantes es muy alta y más aún en zonas como la Amazonia Ecuatoriana donde se busca impactar lo menos posible debido a la gran cantidad de biodiversidad que se ve afectada por la actividad humana. Siendo este sitio uno de los lugares más biodiversos del planeta, es de suma importancia tomar la responsabilidad de cuidar dichos lugares para preservar la vida. Este proyecto es innovador para el contexto ecuatoriano y se han realizado avances en la utilización de energía solar y de paneles fotovoltaicos para el transporte marítimo. (Nasirudin, Chao, Aria, & Utama, 2017).

Para este trabajo de investigación se realizó un estudio orientado a la parte de baterías. Para este estudio se identificó qué tipo de baterías son la mejor opción, considerando los siguientes factores:

- Seguridad.
- Temperatura de las baterías.
- Pico reducido de energía.
- Peso.
- Menor cantidad de cables.
- Menor calibre de cables.
- Mayor vida útil de batería.
- Fácil mantenimiento.
- Alta eficiencia energética.

El problema que se busca solucionar radica en la falta de planificación y de análisis al momento de construir y dimensionar un paquete de baterías para cualquier uso. Con este proyecto se quiere construir un paquete de celdas que sirva para evaluar y probar su funcionamiento con motores eléctricos que puedan ser alimentados por dicho paquete de baterías. Este proyecto está vinculado al proyecto de migración del motor de combustión a uno eléctrico del proyecto de la podadora, donde los objetivos son conseguir adaptar con los elementos necesarios este paquete de baterías al motor. Adicionalmente, se busca que sea un sistema seguro y liviano, por lo que se busca una disminución en el peso, pues el motor de combustión pesa aproximadamente 15 kg.

Como se mencionó anteriormente, cualquier proyecto eléctrico conlleva baterías y estas son uno de los componentes más caros, por lo que es importante proteger dicha inversión y además se debe conseguir que trabajen en un ambiente y estado óptimo. La necesidad de indagar más en el tema de las baterías es importante. En cualquier proyecto, el que todos los componentes funcionen y trabajen en armonía es fundamental. Por ejemplo, en el proyecto de los botes de Kara Solar se pudo apreciar que las baterías funcionaban en un ambiente que no era el óptimo.



Figura 1. Baterías del bote Tapiatpia. (Kara Solar, 2019).

Como se puede apreciar las conexiones no son las mejores y la suciedad también pueden empeorar el deterioro. Existen distintos problemas que pueden presentar las baterías como son el gassing, daños por sobrecarga y sulfatación.

El ordenamiento de las celdas debe poder ser de fácil acceso para permitir las conexiones. Se organizarán en una estructura capaz de incluir sistemas de refrigeración para que estas puedan trabajar a temperatura adecuadas especificadas por los fabricantes. La temperatura de operación de un banco de baterías es muy importante ya que es uno de los factores que más puede afectar e influir en el desempeño de la celda. Adicionalmente, se realizará una simulación que ayude a analizar de mejor manera la refrigeración y transferencia de calor que se dará en el momento que entre en funcionamiento.

Se desea trabajar con estándares de la ingeniería en la parte eléctrica y mecánica. Por el lado eléctrico se debe trabajar con la protección a los peligros eléctricos y además proporcionar de un sistema que sea seguro de operar. La carcasa en la que realizará la estructura procurará ser lo más cercana a las cajas de protección eléctricas que se pueden encontrar en la industria. Para el diseño de carcasa se planea utilizar normas y tipos de cajas eléctricas que se especifican en los estándares de NEMA (National Electrical Manufacturers Association).

Desarrollo del Tema

1. Marco Teórico

1.1 Baterías

1.1.1 Principios de una batería

Una batería es un dispositivo encargado de almacenar energía de forma química para que luego esta energía guardada pueda ser utilizada como energía eléctrica para alimentar una carga. En una batería los elementos básicos son las celdas, las placas (negativas o positivas) que son como electrodos de un material activo y el electrolito, que es el medio por el que se da el proceso de transferencia de iones. A continuación, se presenta en la figura 2 los componentes internos y externos de los que se compone una batería típica.

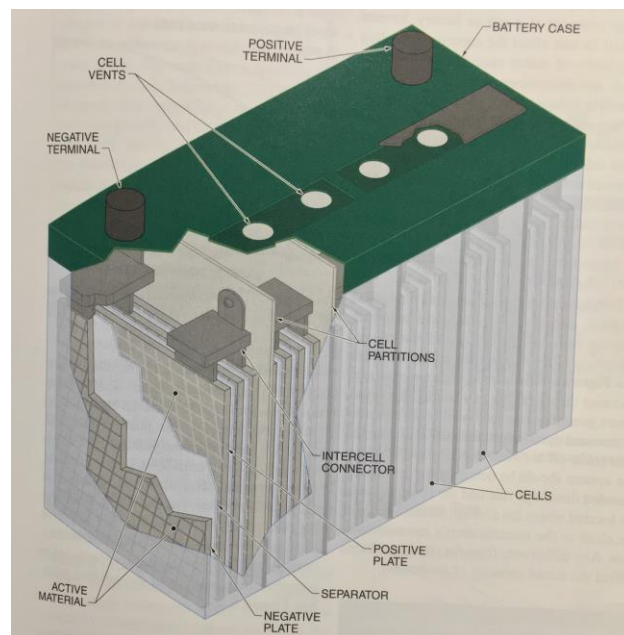


Figura 2. Componentes típicos en varios modelos de baterías. (Dunlop, J. 2010).

Como se puede apreciar, la batería consta de un arreglo de celdas individuales que están conectadas entre sí con el fin de que al final la batería pueda proporcionar un cierto voltaje y corriente.

1.1.2 Capacidad y descarga de una batería

La capacidad de una batería se mide en amperios hora [Ah] y lo que indica es la cantidad de energía eléctrica que esta puede almacenar y proveer en una hora. Por ejemplo, si una batería puede entregar 5 amperios por 10 horas, significa que tiene una capacidad de 50 Ah. En las baterías de plomo ácido, temperaturas altas de la batería pueden ayudar a que esta almacene más energía, pero esto disminuye su vida útil. (Dunlop, J. 2011).

Por otra parte, la descarga de una batería se refiere al proceso en el que la energía química se puede suministrar en energía eléctrica y de esta forma alimentar una carga eléctrica, como, por ejemplo, un motor eléctrico. Este proceso empieza en el instante en que la carga se conecta a los terminales de la batería. Es importante mencionar que durante los procesos de carga y descarga el voltaje real de la batería puede variar. Por ejemplo, una batería con un voltaje nominal de 12 V puede tener hasta 13V durante la carga y disminuir hasta 10.8 V durante la descarga.

1.1.3 Bancos de baterías (Configuración serie y paralelo)

Los bancos de baterías se refieren a un cierto número de baterías que se conectan entre sí para que estas sean capaces de proveer la energía necesaria para alimentar una carga. Dependiendo del número de baterías y del tipo de conexiones que se realicen se pueden obtener diferentes voltajes. Existen dos tipos de configuraciones en las que se pueden conectar las baterías, en serie o en paralelo.

1.2 Transferencia de calor por convección forzada

Para el caso de las baterías, el modo de convección es el más importante pues es el modo por el que se quiere enfriar las baterías para que estas puedan operar a temperaturas correctas y así poder garantizar un buen funcionamiento y eficiencia energética y además cuidar de las baterías para poder aumentar su vida útil.

La transferencia de calor por convección se da cuando existe un fluido en contacto con una superficie y en donde existe un gradiente de temperatura. Para que se pueda dar el intercambio de energía debe existir una diferencia de temperatura y además el fluido debe tener una velocidad.

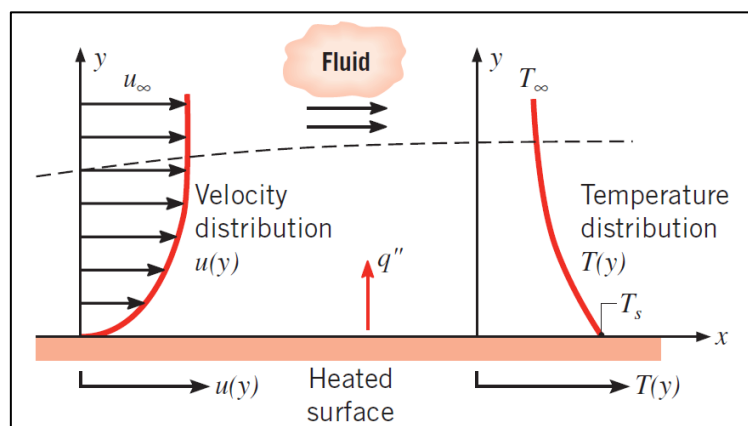


Figura 3. Desarrollo de la capa límite en transferencia de calor por convección. (Incropera, F. et al. 2011).

Una ventaja es que si se usa ventilación como sistema de refrigeración también ayuda a extraer y reducir los niveles de gases peligrosos que puede emitir una batería defectuosa, como pueden ser el monóxido de carbono y el hidrógeno, siendo este último altamente inflamable. A continuación, se presenta una figura de cómo se refrigeran con asistencia de un ventilador componentes de una PCB.

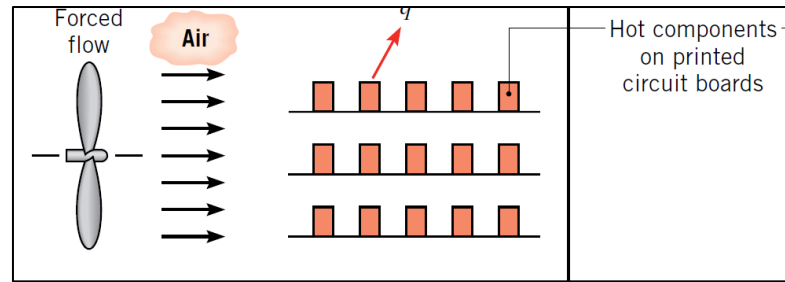


Figura 4. Convección forzada. (Incropera, F. et al. 2011).

2. Metodología

2.1 Evaluación de concepto y selección

Tabla 1. Tabla de evaluación y selección del tipo de batería.

| Evaluación y Selección de Concepto | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|-------------------|----------|-------|
| Tipo de batería | Costo (4) | Eficiencia (3) | Mantenimiento (2) | Peso (2) | Total |
| Litio | 2 | 3 | 3 | 3 | 29 |
| Plomo-Ácido | 3 | 2 | 2 | 3 | 26 |
| Super Capacitores | 1 | 3 | 1 | 3 | 21 |

| Escala | Peso |
|-------------|------------|
| 1 Adverso | 1 Muy bajo |
| 2 Aceptable | 2 Bajo |
| 3 Ideal | 3 Medio |
| | 4 Alto |

Para la selección y evaluación de los distintos tipos de almacenadores de energía se evaluaron cuatro parámetros, siendo estos el costo, la eficiencia, el mantenimiento y el peso. Los parámetros cuentan con un peso del 1 al 4, siendo el cuatro alto, lo que quiere decir que es importante. Se considera que el costo es uno de los elementos más importantes, por ende, se ha decidido otorgarle un valor de 4.

Por el lado de las opciones, se califican en valores de 1 a 3, siendo 3 lo ideal y 1 lo menos adecuado. Los resultados de esta evaluación devuelven el número 29 en las

baterías del tipo de litio. Por ende, se procede a utilizar este tipo de química para el proyecto.

2.2 Flujo de procesos

A continuación, se plantea un diagrama de flujo en donde se establece los procesos que se realizarán a lo largo de este estudio para llegar al objetivo planteado.

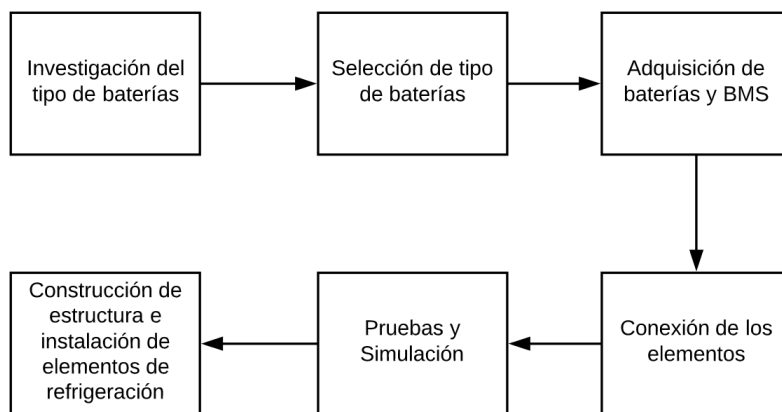


Figura 5. Diagrama de flujo de procesos.

Como se aprecia en la figura 5, se comenzará realizando una investigación con respecto a los fundamentos y teoría detrás de las baterías. Posteriormente, se comprenderá el funcionamiento y los componentes del banco de pruebas incluyendo elementos como baterías, BMS, cableado y ventiladores. Al conocer mejor los componentes se puede conocer cuál de estos influye en la eficiencia y cuáles de estos son los más propensos a fallar o a generar problemas. De dicha investigación y debido a los requisitos del cliente, se opta por utilizar baterías de litio. Específicamente, las celdas 18650. Estas tienen una geometría cilíndrica y sus valores más relevantes son: voltaje de 12 V y capacidad de 3000 mAh. Para las conexiones se utilizan cables con terminales que faciliten al usuario las conexiones entre los arreglos de celdas y entre el banco y el equipo a conectar.

Para las pruebas y simulación se utiliza la opción de simulación de flujo del software SolidWorks. Y el modelado de las partes y elementos en el software Inventor

Finalmente, después de la construcción se realizan las pruebas de voltaje final del banco y pruebas térmicas con ayuda de una cámara térmica FLIR para poder obtener resultados de temperaturas de las celdas.

2.3 Terminología Importante

Dentro del ambiente de lo eléctrico y más específicamente de las baterías, existen términos que son importantes de saber para entender las palabras que se usen en el contexto.

- **Ánodo:** el terminal negativo dentro de la batería.
- **BMS** (por sus siglas en inglés Battery Management System): Sistema de control para carga y descarga de la batería, voltaje, temperatura, comunicación y para el funcionamiento en general de un paquete de baterías.
- **Cátodo:** el terminal positivo dentro de la batería.
- **C-rate:** Tasa en la cual la batería se puede cargar o descargar.
- **Capacidad:** cantidad de energía de la batería. Se puede medir en Ah.
- **Profundidad de descarga** (o por sus siglas en inglés DOD): Medida de cuanta energía se va a utilizar en cierta aplicación.
- **Electrolito:** Material que puede ser líquido, sólido o gel y que sirve de medio para el intercambio de iones entre el ánodo y el cátodo.
- **Densidad de energía:** Medida de cuanta energía posee una batería o un paquete de baterías en relación con su masa o volumen. [Wh/kg]

- Densidad de potencia: Medida de potencia que posee una batería o un paquete de baterías en relación con su masa o volumen. [W/kg]
- Estado de carga: Medida de cuanta carga tiene una batería en un tiempo específico.

Estas definiciones se obtuvieron del libro *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology*; (p. 51-56), del autor John Warner.

2.4 Materiales y selección de componentes

Tabla 2. Características de celdas 18650.

| Celdas 18650 | |
|--|------------------------|
| Modelo | INR18650-30Q |
| Voltaje | 3.6 [V] |
| Voltaje después de carga fresca | 4.2 [V] |
| Capacidad nominal | 3000 [mAh] |
| Peso | 45 [g] |
| Altura | 64.85 +/- 0.15 [mm] |
| Diámetro | 18.33 +/- 0.07 [mm] |
| Impedancia | 22.15 +/- 2 [miliohms] |

Tabla 3. Características del BMS

| BMS | |
|---|--|
| Modelo | BMS 4s 30 ^a Li-ion batería de litio 18650 cargador PCB |
| Corriente de trabajo | 30 [A] |
| Voltaje de detección de sobrecarga | 4.28 + 0.05 [V] |
| Dimensiones | 56x45 [mm] |

2.5 Requerimientos del cliente

A continuación, se mencionan los requerimientos requeridos para este paquete de baterías. Estos requerimientos son los necesarios para así formar un paquete de baterías que sirva para la alimentación del motor para el proyecto de la podadora.

Tabla 4. Requerimiento de diseño.

| | |
|-------------------------|-----------|
| Tipo de baterías | Ion-Litio |
| Voltaje | 12 [V] |
| Capacidad | 20 [Ah] |
| # de BMS | 1 |

2.6 Recolección y selección de baterías

Durante el mes de octubre y noviembre se pudo recolectar entre el reciclaje electrónico baterías antiguas de laptop. En el departamento de robótica se almacenaron para que estas puedan ser desarmadas y así obtener celdas del tipo 18650 de litio. En muchos de los casos, la falla de solamente una de las celdas conlleva a que las otras también se empiecen a comportar de manera ineficiente y que por ende el usuario de dicho dispositivo dé de baja a la batería.



Figura 6. Batería de laptop.



Figura 7. Celdas 18650 dentro de la batería de laptop.

De las baterías de laptop se separaron las celdas que tenían un mayor voltaje, lo que significa que se encontraban en mejor estado para que estas puedan ser cargadas y sirvan para armar el paquete.

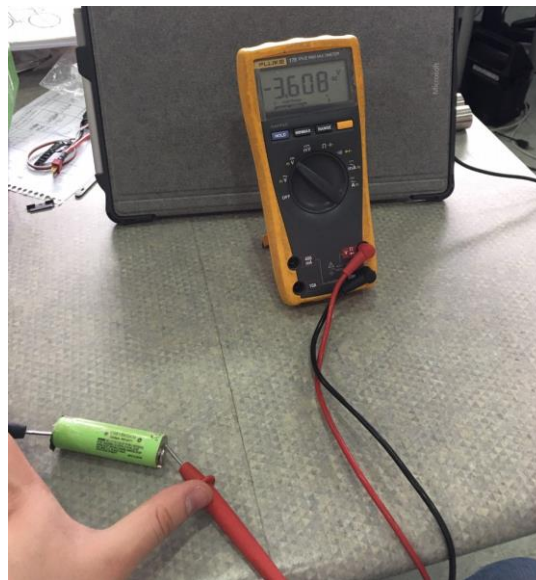


Figura 8. Prueba de una de las baterías 18650. (Lectura de voltaje en el multímetro: 3.6V).

Las baterías que tenían un voltaje mayor a 2.8V fueron las seleccionadas para poder ser utilizadas ya que estas podían volver a ser cargadas.



Figura 9. Batería en el proceso de carga.

Se considera que las celdas se cargan completamente cuando llegan a un voltaje aproximado de 4.2V. De todas las baterías de laptops se pudieron obtener 20 celdas que servirán para hacer el prototipo del banco de baterías.

Resultados y Discusión

3. Reporte de Diseño

Las baterías deben ser conectadas en una combinación de conexiones en serio y paralelo para obtener el voltaje y capacidad requerido (12V20Ah). Para esto, la combinación necesaria es de 4s5p, es decir un total de 20 celdas. Lo necesario para poder construir este tipo de ordenamiento es un diagrama eléctrico donde se muestre el número y conexiones que debe haber entre los terminales de las baterías para poder llegar a los requerimientos.

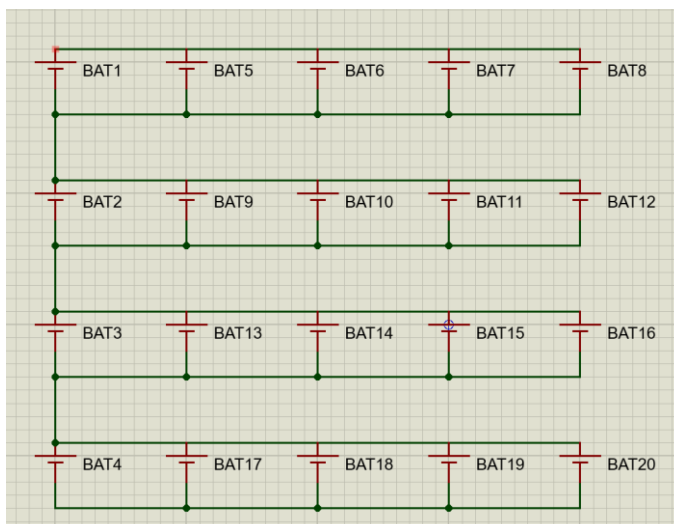


Figura 10. Diagrama eléctrico de baterías.

4. Modelado y Prototipo

Para tener un mejor entendimiento de cómo debería verse el paquete de baterías se realizó un modelado en el programa Inventor.

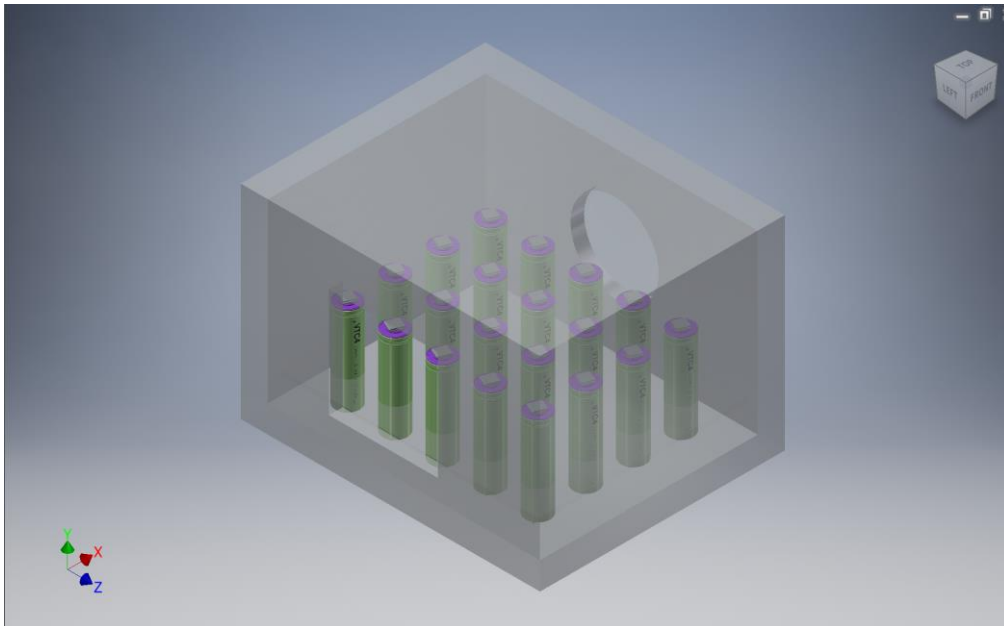


Figura 11. Modelado del prototipo.

Con ayuda del programa de SolidWorks se simuló un estudio CFD para determinar como se debería enfriar el paquete de baterías cuando se coloque un ventilador a uno de los lados de la caja.

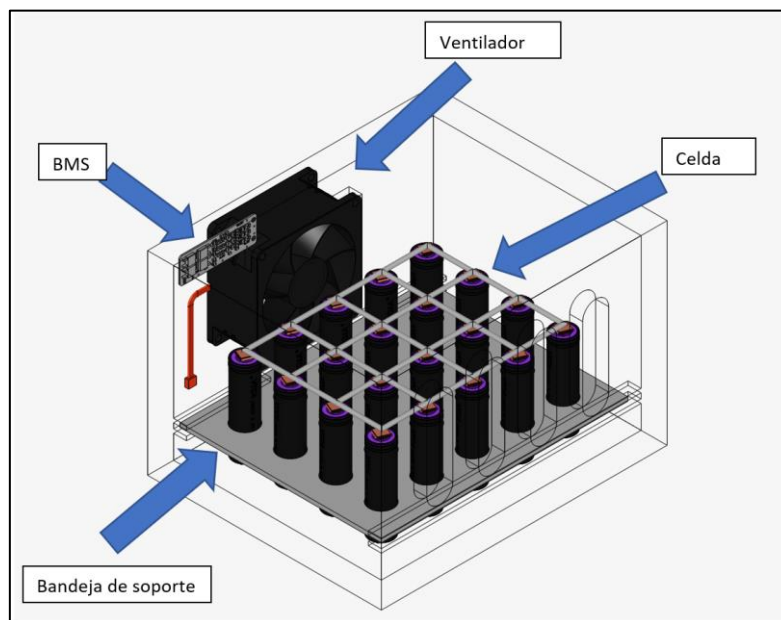


Figura 12. Desglose de los componentes del prototipo del banco de prueba.

Una vez que las 20 celdas que se recuperaron fueron cargadas satisfactoriamente a un voltaje nominal de 3.6 – 4.2 V se pudo proceder a realizar la soldadura con un cable

AWG 10. Para este proceso se utilizo un cautin del tipo pistola y tipo lápiz, estaño y pomada para soldadura eléctrica.



Figura 13. Cautín de soldadura tipo pistola y tipo lápiz.



Figura 14. Estaño y pomada para soldar.



Figura 15. Proceso de estañado en cable para soldar en los terminales de la celda.



Figura 16. Soldadura en la parte superior de las celdas.



Figura 17. Medición del voltaje del paquete de baterías.



Figura 18. Prototipo de paquete de baterías finalizado.

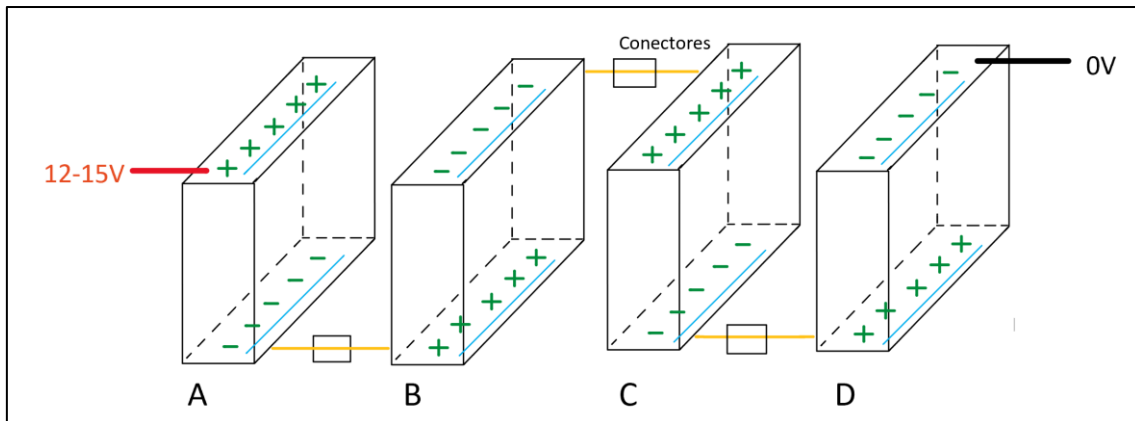


Figura 19. Diagrama de conexiones del paquete de celdas.

Una vez completado el paquete de baterías y de revisar que se los conectores estuvieran apropiadamente unidos se procedió a conectar el paquete de baterías al BMS. Para esto se utilizó el BMS de 4s30A.



Figura 20. Diagrama de conexiones para BMS.

Basándose en la figura 20 se puede realizar las conexiones del paquete de batería con el BMS utilizando los conectores puente entre los arreglos y los conectores rojo (positivo) y negro (negativo).

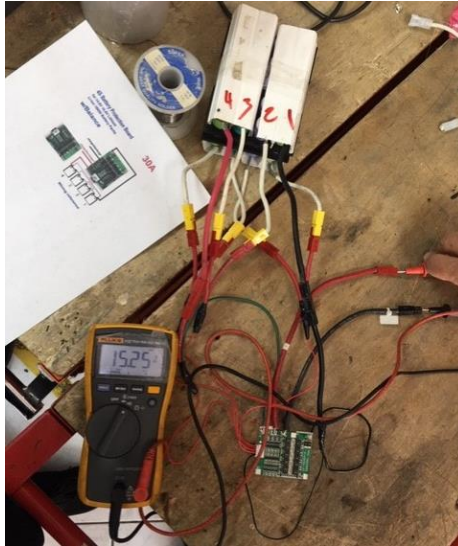


Figura 21. Conexión del paquete de baterías con el BMS.

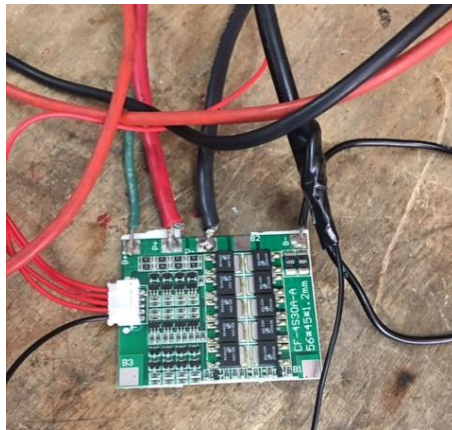


Figura 22. Conexiones en el circuito del BMS.

La caja externa se realizó en tol de 1 mm de espesor y se soldó en la base y en los lados para poder unirla. Se realizan agujeros para el ventilador y otro que sirva de salida para el flujo de aire. Para el agujero de salida o de escape se usarón dos distintos perforadora o “sacabocados”, uno de 15/16 y otro de 61.5 mm. Posteriormente se realizó con ayuda de un taladro los agujeros para los pernos del ventilador y finalmente se pinta la caja para mejorar su aspecto.

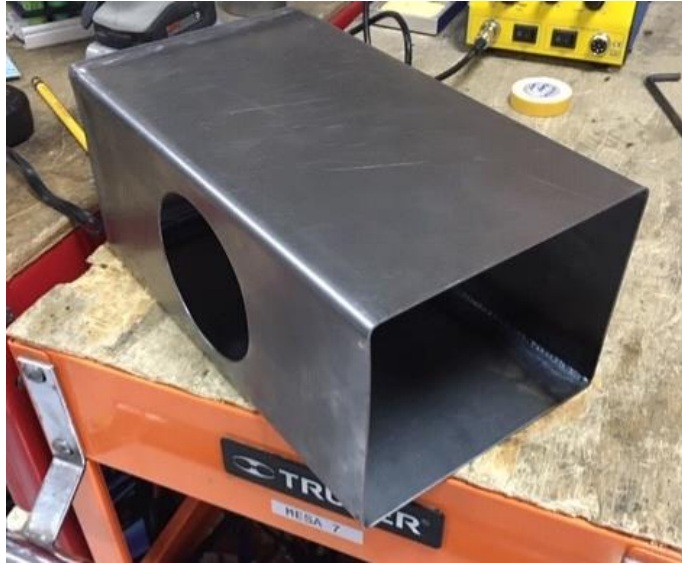


Figura 23. Caja en estado inicial.



Figura 24. Perforadoras o sacabocados utilizados.

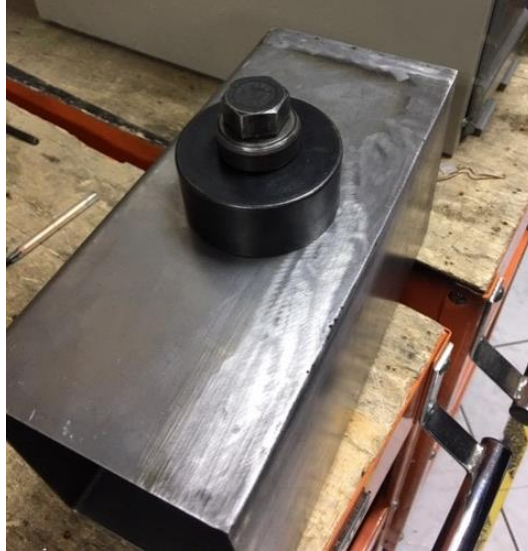


Figura 25. Uso del sacabocados para realizar el agujero de salida.



Figura 26. Caja exterior pintada y con montaje de ventilador.



Figura 27. Prototipo final y caja con diagramas de conexión y tabla de características.

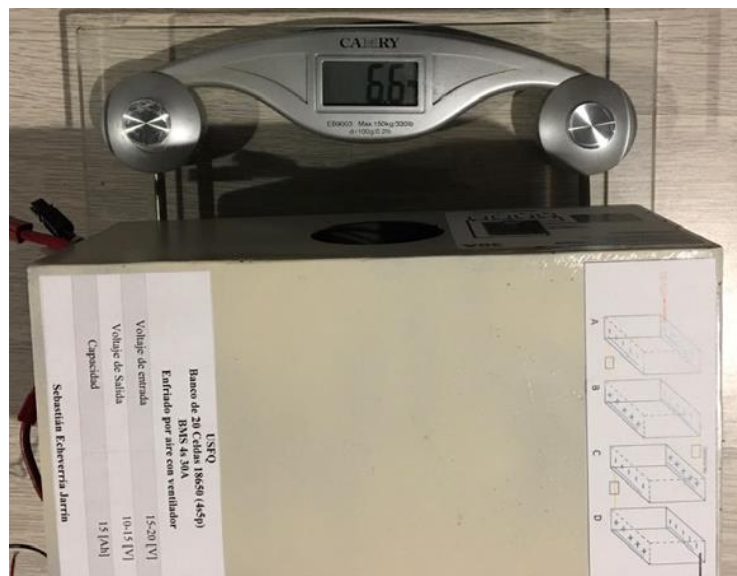


Figura 28. Peso del prototipo final. (Lectura de la balanza 6.6 lb)

5. Simulaciones

En la plataforma SimScale se encontró una simulación muy similar que justamente se enfoca en la parte térmica de un paquete de celdas 18650. Sin embargo, para este caso la única diferencia es que el paquete es más pequeño al ser de 4x4.

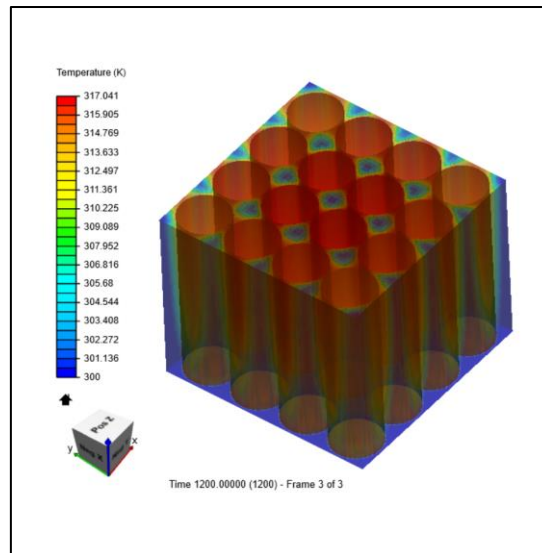


Figura 29. Simulación de SimScale de paquete 4x4 de baterías 18650. (Xua00988; SimScale).

Para la simulación de este caso se prefirió utilizar el software SolidWorks. El primer paso es realizar el modelado en algún software CAD. Como se mostró anteriormente, el modelado del diseño del prototipo se realizó en Inventor. De este modo se puede exportar el archivo en formato .step para que este pueda ser leído en SolidWorks. Una de las consideraciones importantes que se realizó para este modelo fue diseñar las celdas como simplemente unos cilindros para que de esta forma el mallado no tenga inconvenientes. Se debe definir un material para los elementos (caja, bandeja, y celdas). Para esto se definió las celdas y la caja de aluminio y la bandeja de plástico. Una vez hecho esto se procede a generar un mallado y verificar que no existan interferencias entre los elementos. Producida la malla se puede generar los objetivos de la simulación y también se puede declarar cuales son las condiciones en las que se situará la simulación y así también poder generar un volumen de control interno dentro de la caja para que ese sea el dominio de la simulación.

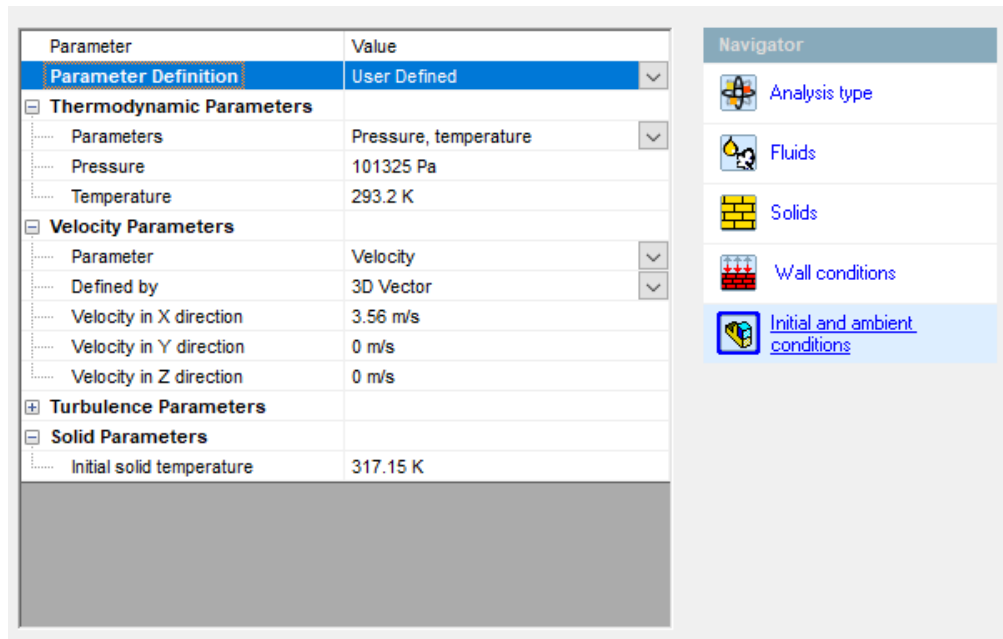


Figura 30. Parámetros de condiciones iniciales de velocidad y temperatura.

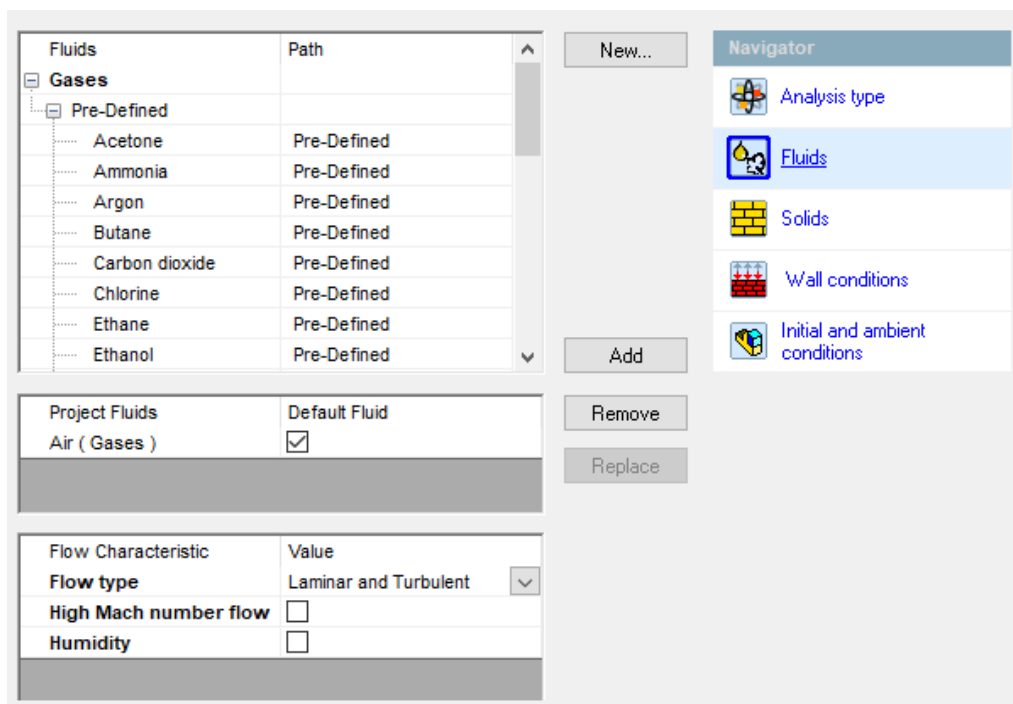


Figura 31. Selección del fluido para la simulación.

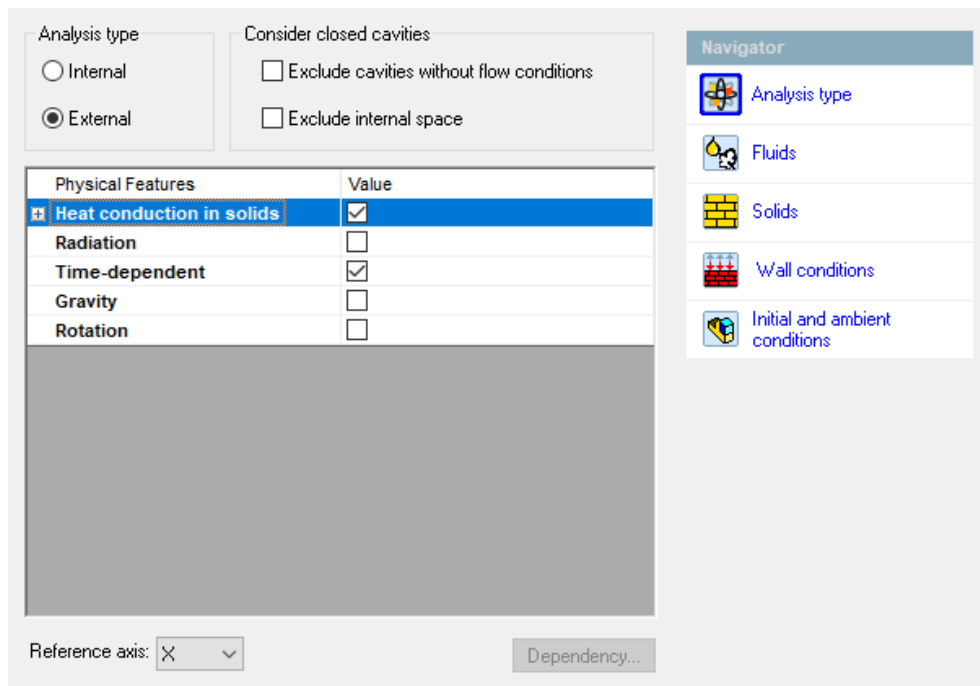


Figura 32. Selección de tipo de análisis.

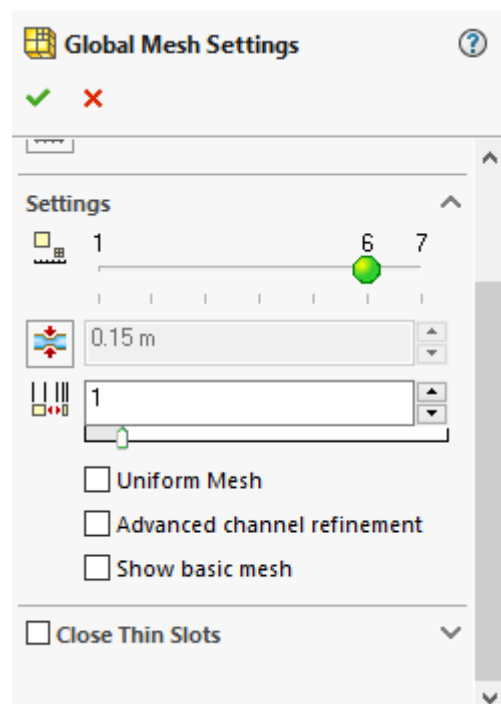


Figura 33. Configuración para el tipo de mallado.

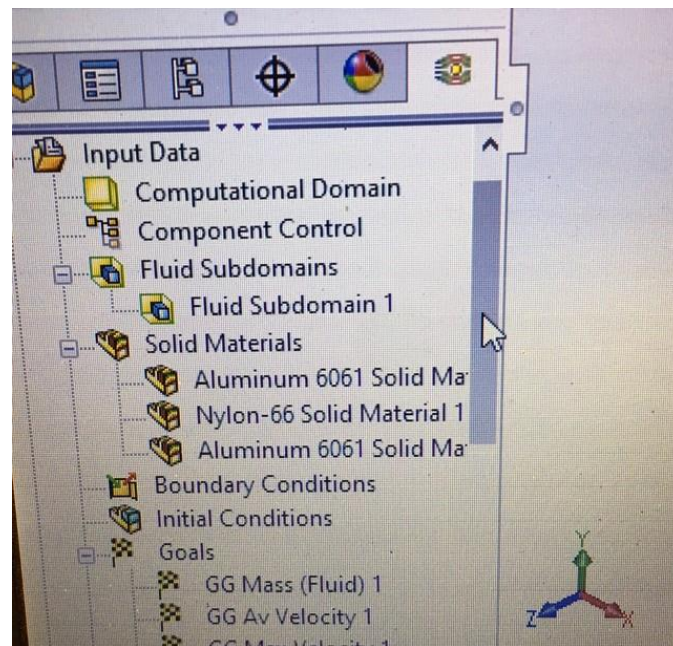


Figura 34. Materiales para la simulación.

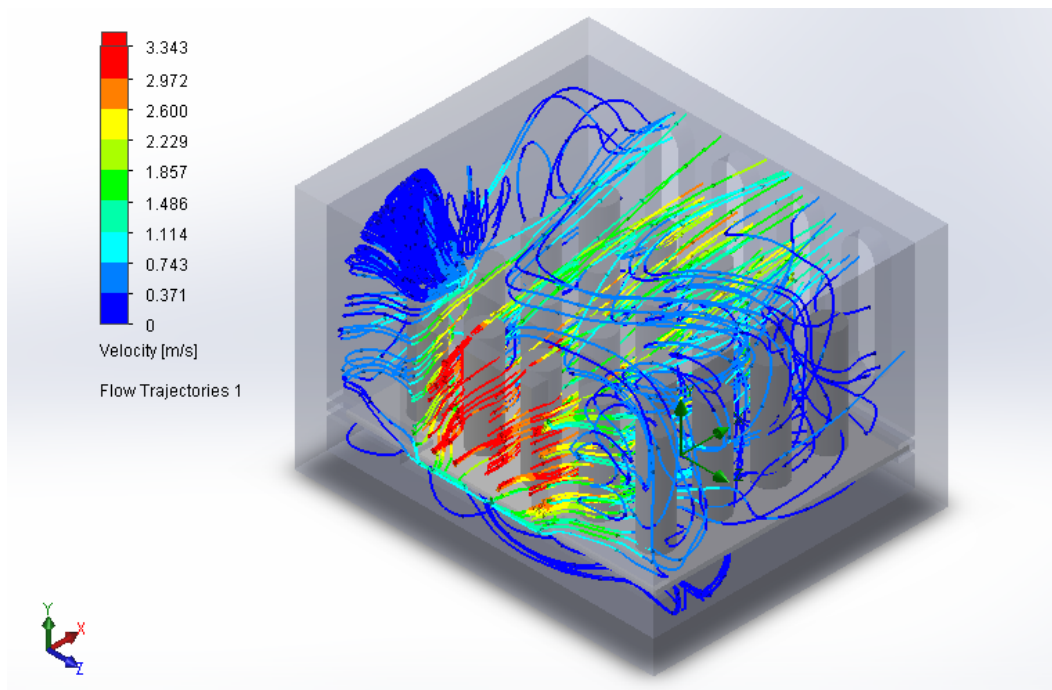


Figura 35. Simulación de trayectoria de flujo de aire.

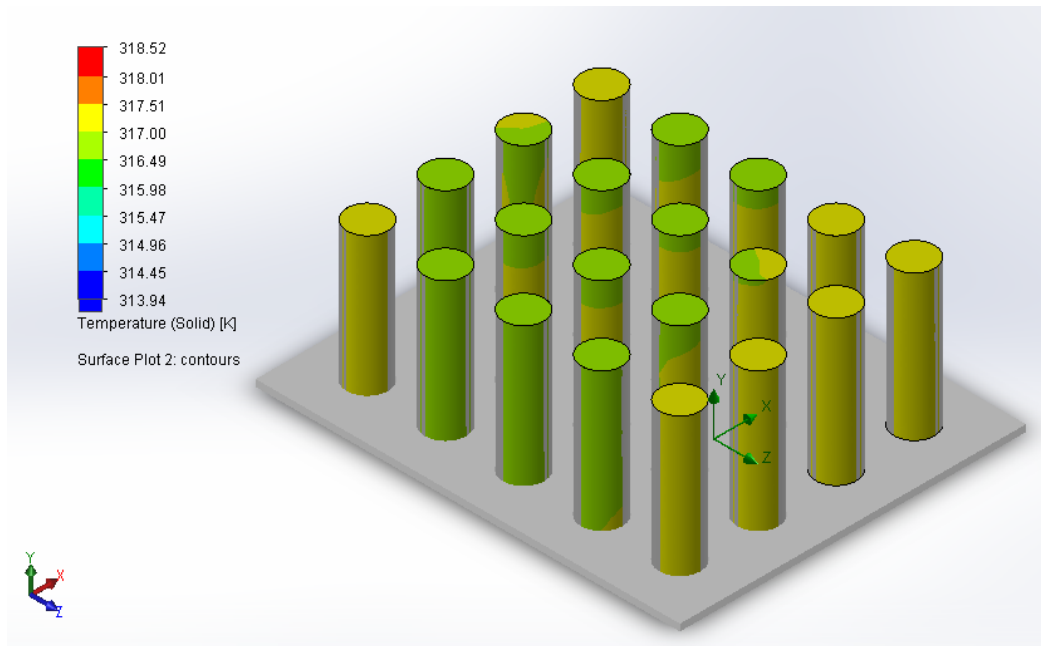


Figura 36. Simulación de trayectoria de flujo de aire.

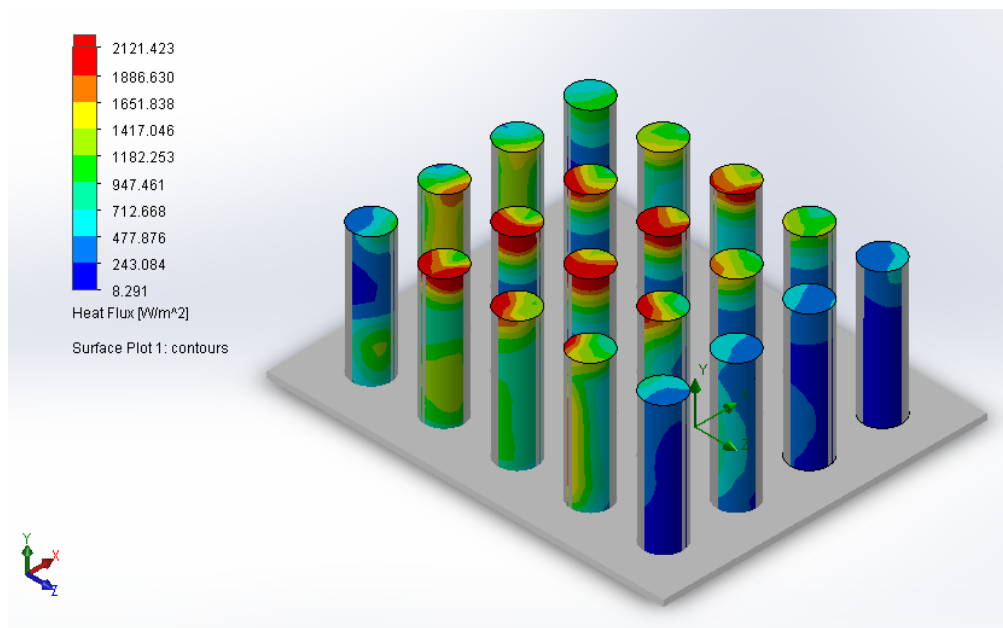


Figura 37. Simulación del flujo de calor de las celdas.

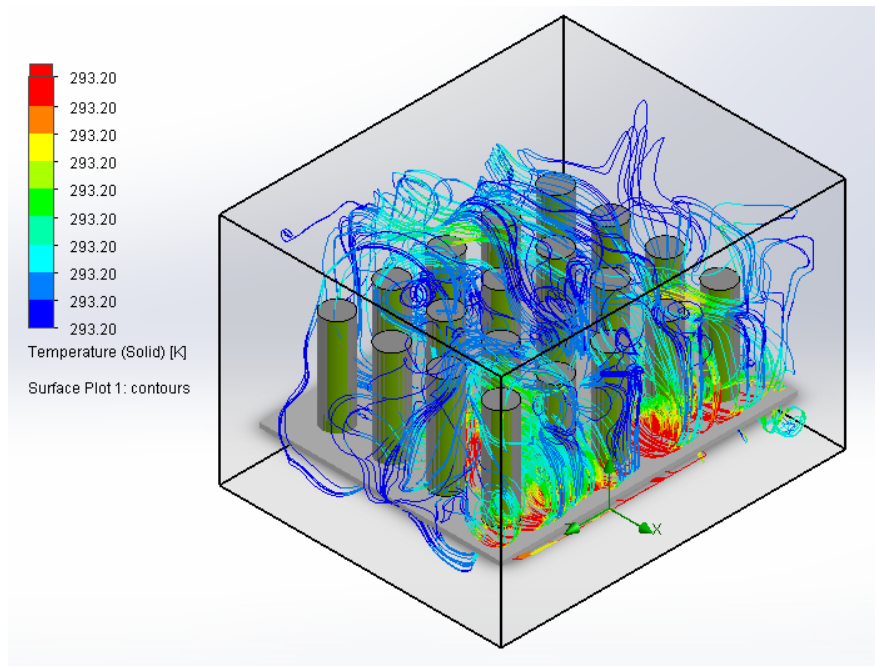


Figura 38. Simulación de enfriamiento de celdas por aire dentro del volumen de control.

Gracias a los resultados obtenidos en la simulación podemos notar que si se coloca un ventilador que genere un flujo constante de aire este es capaz de mantener a las celdas a una temperatura óptima. Las celdas se encuentran a una temperatura ambiente de 293 K o 19.85 grados Celsius, de forma que no exceden una temperatura de 50 grados Celsius, ya que en el caso que lleguen a esta temperatura se empieza a disminuir su vida útil. Adicionalmente, se simula el flujo dentro de la caja de producido por un ventilador externo, para que de esta forma se dé una transferencia de calor por convección forzada. Se puede identificar que en las zonas de color más rojizo es donde existe una mayor velocidad del fluido. También se puede apreciar que, aunque el flujo circula a través de la mayor parte superficial de las celdas y esto representa algo bueno pues se entiende que ayuda al enfriamiento de todas las celdas. Finalmente, para el enfriamiento de las celdas se usa un ventilador para que se dé un flujo de aire y que mediante convección forzada se produzca la transferencia de calor.

6. Cálculo de transferencia de calor

Primeramente, es necesario calcular el número de Reynolds para el caso de un de un fluido que se enfrenta a una geometría cilíndrica.

$$Re_D \equiv \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (1)$$

Siendo V la velocidad del fluido, D el diámetro del cilindro y ν la viscosidad cinemática del fluido.

Debido a que las celdas son elementos cilíndricos, se podría considerar su similitud a unos bancos de tubos. Estos pueden ser ordenados de forma alineada o escalonada.

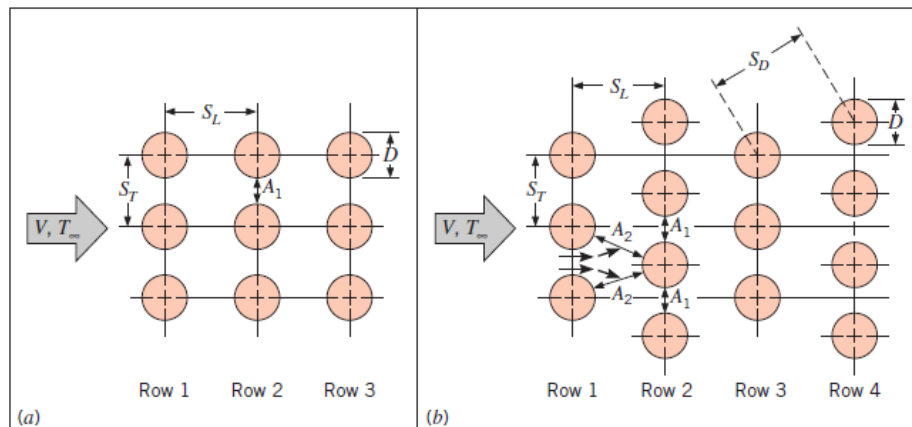


Figura 39. Arreglo de tubos. (a) Alineada. (b) Escalonada. (Incropera; 2011).

Para este caso, se asemeja más al arreglo (a) Alineado. Como se puede apreciar de la figura 39, las distancias entre los centros de los cilindros, entre sus extremos y el diámetro de los cilindros son los datos relevantes para los cálculos. Asumiendo que la velocidad es del fluido inicialmente sea de 1m/s. Por lo tanto:

$$Q = AV \quad (2)$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.02265}{\frac{\pi(9 \times 10^{-3})^2}{4}} = 3.56 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (3)$$

$$V_{max} = \frac{21 \times 10^{-3}}{(21 - 19) \times 10^{-3}} (3.56) = 37.38 \text{ m/s}$$

Por lo que se puede calcular la ecuación (1):

$$Re_D = \frac{(37.38)(19 \times 10^{-3})}{15.28 \times 10^{-6}} = 46480.4$$

y

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{21}{21} = 1$$

De las tablas 7.5 y 7.6 del libro de Incropera para los factores C_1 , m y C_2

$$C_1 = 0.27 \quad m = 0.63$$

$$C_2 = 0.92$$

Se procede a calcular el número de Nusselt

$$\overline{Nu}_D = C_2 C_1 Re_{D,max}^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (4)$$

$$\overline{Nu}_D = (0.92)(0.27)(46480.4)^{0.63} (0.709)^{0.36} \left(\frac{0.709}{0.705} \right)^{0.25} = 191.60$$

$$\bar{h} = \overline{Nu}_D \frac{k}{D} \quad (5)$$

$$\bar{h} = 191.60 \times \frac{25.75 \times 10^{-3}}{19 \times 10^{-3}} = 259.67 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\bar{h} = \frac{259.67}{20} = 12.98 \frac{W}{m^2 K} \text{ (por batería)}$$

$$T_s - T_o = (T_s - T_i) \exp\left(-\frac{\pi DN\bar{h}}{\rho V N_T S_T C_p}\right) \quad (6)$$

$$T_s - T_o = (44 - 20) \exp\left(-\frac{\pi(19 \times 10^{-3})(20)(259.67)}{(1.1584)(3.56)(4)(21 \times 10^{-3})(1006)}\right)$$

$$T_s - T_o = 9.86^\circ C$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}\right)} \quad (7)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(24 - 9.86)}{\ln\left(\frac{24}{9.86}\right)} = 15.895$$

$$q' = N(\bar{h}\pi D \Delta T_{lm}) \quad (8)$$

$$q' = 20(259.67 \times \pi \times (19 \times 10^{-3}) \times 15.895) = 4.92 \text{ KW/m}$$

Dado este resultado, se puede saber que la tasa de calor por unidad de longitud de tubo es de 4.92 KW/m. Adicionalmente, se puede conocer que la temperatura final del aire (T_o) es de 34.14°C, por lo que vemos un aumento de 14.14°C en la temperatura del aire al ser este el fluido que absorbe el calor generado por las celdas.

7. Dimensionamiento para podadora Sears Craftsman LT1036

Como se mencionó anteriormente, otro de los proyectos actuales de la Universidad consta de la migración de un motor de combustión a un motor eléctrico para una podadora. Tal como es el caso del bote, se busca reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles. Para este proyecto, el uso del paquete de baterías es más aplicable debido a que se trata de un motor más pequeño. El motor eléctrico que se usa para este proyecto es un Siemens 3 Motor 1LA7 080-4YA60. Las características de este motor son:

Tabla 5. Especificaciones de motor Siemens.

| | | | |
|---|--------------|------------------|-----------|
| Tipo | | 1LA7 080-4YA60 8 | |
| Peso [kg] | | 8,1 | |
| Potencia | | 1 [HP] | 0,75 [kW] |
| Velocidad Nominal [rpm] | | 1660 | |
| Corriente nominal [A] | 220 V | 350 | |
| | 440 V | 1,75 | |
| Eficiencia [%] | | 69.2 | |
| Factor de potencia [cos ϕ] | | 0,87 | |
| Corriente de arranque [A] | | 3,7 | |

Conociendo estos datos se puede realizar un diagrama de circuito y ciertos cálculos que nos ayuden a ver qué elementos se necesitan y que autonomía se puede obtener con un paquete de baterías de 12V 20Ah.

El factor de potencia es justamente el coseno del ángulo que se forma en el triángulo de potencias. El factor de potencia ayuda a saber que porción de la energía que produce el motor es realmente la que se utiliza. En este caso sabemos que el factor de potencia del motor es de 0,87 por lo tanto el ángulo es calculado de la siguiente manera:



Figura 40. Gráfico de triángulo de potencias y factor de potencia. (MyG Inc.).

$$\cos\varphi = 0,87$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,87) = 29,54^\circ$$

Primeramente, sabemos que el paquete de baterías es capaz de producir una corriente directa (DC) y el motor que se debe energizar es un motor trifásico que necesita de corriente alterna (AC). Adicionalmente, como vimos de la tabla de característica del motor, el voltaje necesario es de 220V. Para poder hacer esta conversión de corriente de directa hacia alterna y también aumentar la tensión del sistema de 12V a 220V es necesario un inversor.

Para simplificar las cosas, primero se toma el caso de que se tratara de un motor monofásico AC que funciona a un voltaje de 220V. Este se le podría considerar un caso ideal debido a que el sistema se vuelve más simple.

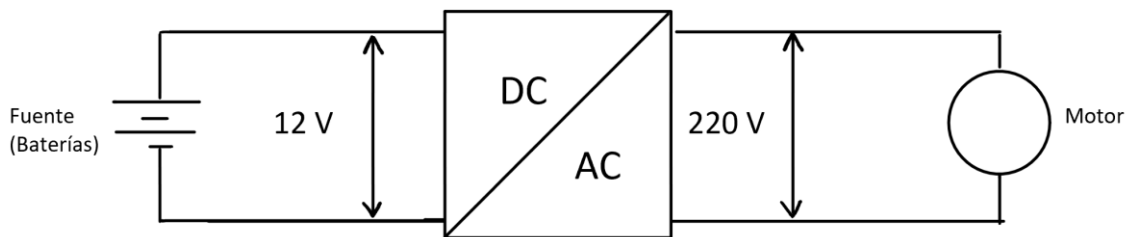


Figura 41. Diagrama de conexiones para motor monofásico (Caso ideal).

$$\text{Corriente nominal: } I_N = 1,75A$$

$$\text{Potencia Motor} = P_{motor} = 750 W$$

$$P = IV \quad (9)$$

$$I = \frac{750}{12 V} = 62,5 A$$

$$t = \frac{20 \text{ Ah}}{62,5 \text{ A}} = 0,32 \text{ h} = 19,2 \text{ min}$$



Figura 42. Gráfico de corriente vs tiempo.

Dados estos resultados se determina que el tiempo de autonomía de un solo paquete con 20 celdas 18650 es de 19,2 minutos. Las suposiciones que se realizaron son que no existen caídas de tensión en los elementos por sus propias resistencias internas, que el motor es monofásico y también la falta del variador de frecuencia. Tampoco se considera el pico de corriente que se genera al encender el motor. La corriente de arranque para este motor es de 3,7 A y justamente es la corriente necesaria para superar la resistencia del motor a la rotación. Como se puede apreciar de figura 42, se da un pico de corriente, siendo este el valor más alto de corriente necesario para poder encender el motor.

8. Cálculo de potencias

Conociendo la potencia activa, se puede calcular:

$$\cos 29,54 = \frac{750}{S}$$

$$S = 0,86 \text{ KW}$$

$$Q = 0,86 \sin(29,54) = 0,42 \text{ KVAR}$$

Por lo que el triángulo de potencias queda de la siguiente manera:

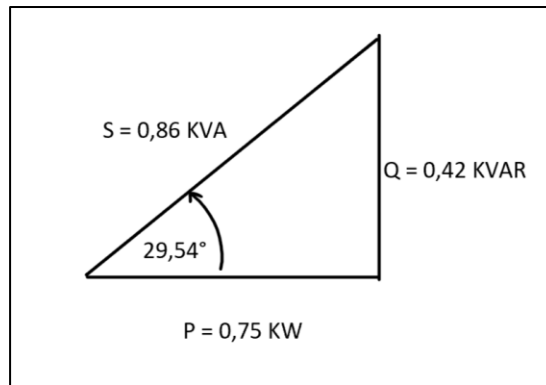


Figura 43. Triángulo de potencias resultantes.

Para el caso real, sabemos que se trata de un motor trifásico y además se utilizará un variador de frecuencia. Como se puede intuir del nombre, un motor trifásico necesita de tres fases que tienen un desfase de 120° . Para esto se puede realizar entradas de las fases del tipo delta o del tipo y.

La corriente trifásica se distribuye generalmente por cuatro alambres, siendo uno de estos tierra y los demás los necesarios para transmitir las tres fases restantes. La corriente trifásica vista gráficamente con el desfase se ve como en la siguiente figura:

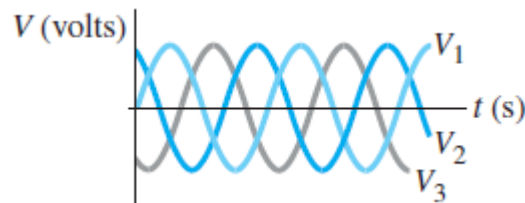


Figura 44. Tres fases de voltaje con desfase de 120 grados. (Giancolli, 2009).

La ventaja de los motores trifásicos es que son capaces de proveer de un flujo de potencia, mientras que los de corriente alterna monofásicos estarían dando lo potencia por pulsos. Los cálculos de potencia realizados anteriormente no cambian en caso de un motor trifásico. Las consideraciones necesarias para este caso radican en la implementación de un variador de frecuencia con entrada monofásica y salida trifásica.

Esta salida trifásica del inversor es la entrada al motor en una configuración de estrella o tipo y.

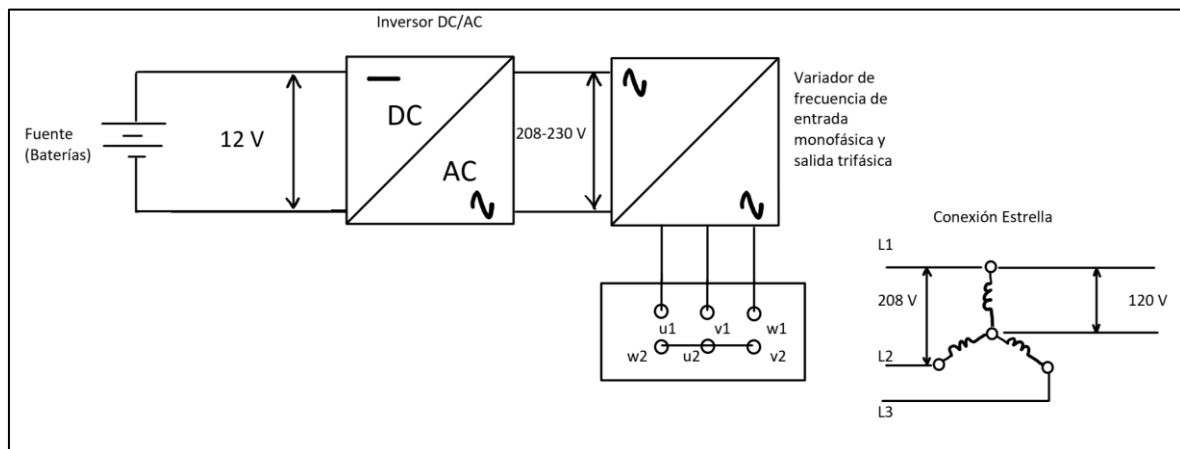


Figura 45. Diagrama de conexiones para motor trifásico.

Para comprobación de que el triángulo de potencias sale igual se puede calcular las potencias reactiva y aparente con las fórmulas de potencias para una configuración en trifásica.

$$P = 3 \times V_F \times I_F \times \cos \varphi \quad (10)$$

$$Q = 3 \times V_F \times I_F \times \sen \varphi \quad (11)$$

$$S = 3 \times V_F \times I_F \quad (12)$$

Utilizando las ecuaciones (10), (11) y (12) se obtiene:

Para la potencia por línea:

$$P_L = \frac{0,75 \text{ KW}}{3} = 0,25 \text{ KW}$$

$$0,25 \text{ KW} = V_F \times I_F \times \cos \varphi$$

Siendo V_F el voltaje fase-neutro y I_F la corriente fase-neutro, se puede despejar la corriente.

$$I_F = \frac{0,25 \times 10^3}{120 \times 0,87} = 2,39 A$$

$$Q = 3 \times 120 \times 2,39 \times \sin 29,54 = 424,20 VAR = 0,42 KVAR$$

$$S = 3 \times 120 \times 2,39 = 860,4 VA = 0,86 KVA$$

Resultando el mismo triángulo de potencias de la figura 33.

En comparación, en una conexión en estrella la tensión de cada fase va a ser $\sqrt{3}$ menor a la tensión de línea. Y la intensidad de cada fase será igual a la intensidad de línea. Mientras que en una configuración delta o de triángulo, la intensidad de cada fase será $\sqrt{3}$ menor que la de línea y la tensión de cada fase es igual a la tensión de línea. Cumpliéndose así las ecuaciones (13), (14), (15) y (16). (n/d; s/f).

Para estrella:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

$$V_F = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 V$$

$$I_F = I_L \quad (14)$$

$$I_F = 2,39 A$$

Para delta:

$$V_F = V_L \quad (15)$$

$$V_F = 208 V$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

$$I_F = \frac{2,39}{\sqrt{3}} = 1,38 A$$

Otra comprobación es calcular la potencia para una configuración en estrella se toma en cuenta la tensión y la corriente de línea, siendo las ecuaciones:

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \varphi \quad (17)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sen \varphi \quad (18)$$

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \quad (19)$$

Resolviendo para las ecuaciones (17), (18) y (19) da como resultado:

$$P = \sqrt{3} \times 208 \times 2,39 \times 0,87 = 749,1 \approx 0,75 \text{ KW}$$

$$Q = \sqrt{3} \times 208 \times 2,39 \times \sen 29,54 = 0,42 \text{ KVAR}$$

$$S = \sqrt{3} \times 208 \times 2,39 = 0,8610 \text{ KVA}$$

Como se puede apreciar, siempre se obtiene el mismo triángulo de potencias.

En el anexo C se incluyen posibles modelos tanto para el inversor de DC/AC de 12V a 220V y del variador de frecuencia de entrada monofásica y salida monofásica de 230 V.

9. Pruebas

9.1 Voltaje Final del prototipo de banco de baterías

Para esta prueba, con un multímetro se mide el voltaje que es capaz de suministrar el banco de baterías para confirmar si cumple con lo requerido. Debido al alto nivel de carga de las celdas (4.2 V) es posible que el voltaje se incremente hasta 15 V como se puede apreciar en la figura a continuación.



Figura 46. Lectura de voltaje del prototipo. (15.25 V)

9.2 Pruebas de temperatura

Para las pruebas de temperatura, se sometió a las celdas a un proceso de carga. Para esto se utilizó una fuente BK Precision en donde se configura un voltaje de 16.3 V y una corriente de carga de 2.05 A.



Figura 47. Fuente BK Precision.

Inicialmente, se puede apreciar que las baterías se encuentran a una temperatura media de 17.5°C.



Figura 48. Imagen térmica en estado inicial.

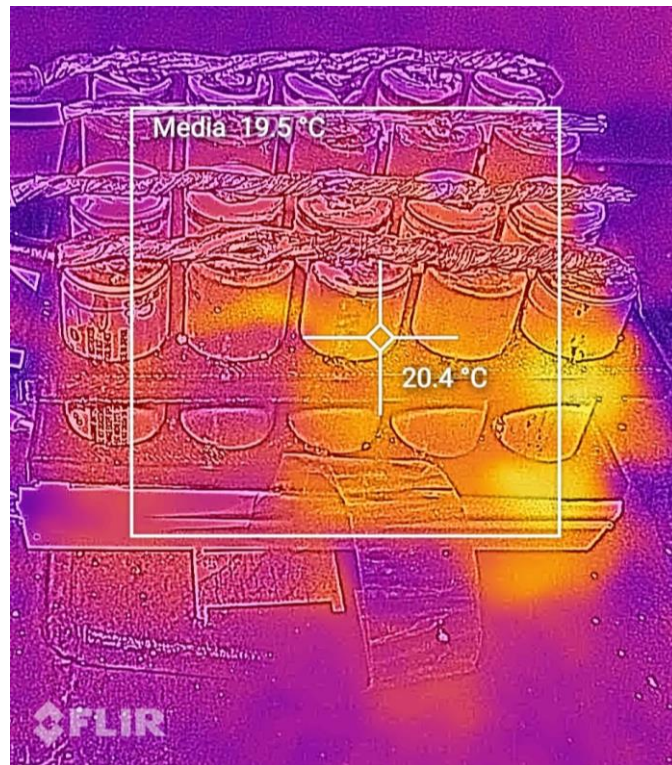


Figura 49. Imagen térmica después de 1min 30seg.

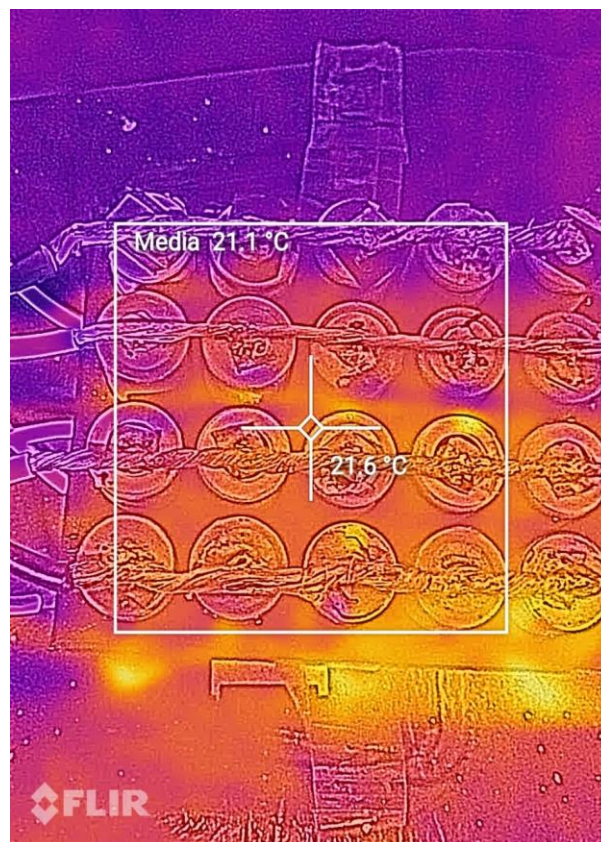


Figura 50. Imagen térmica en vista superior.

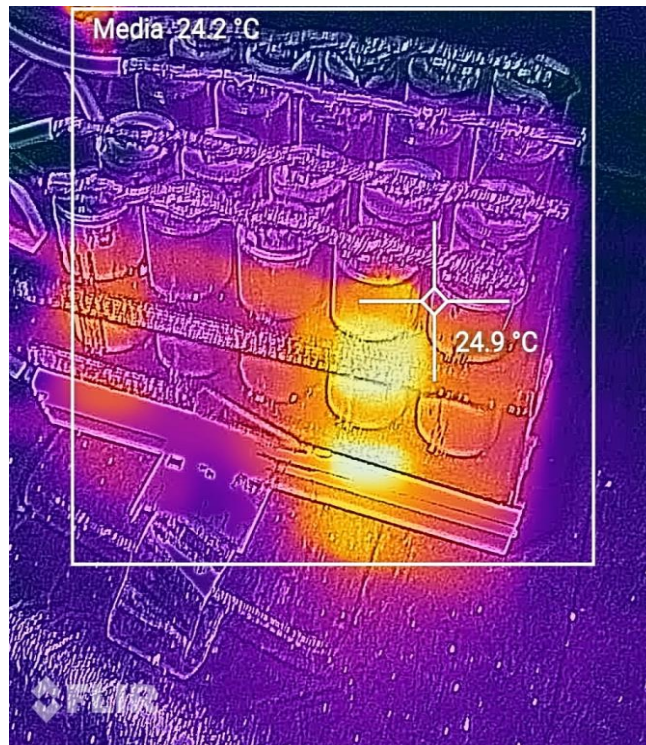


Figura 51. Imagen térmica después de 5 min.

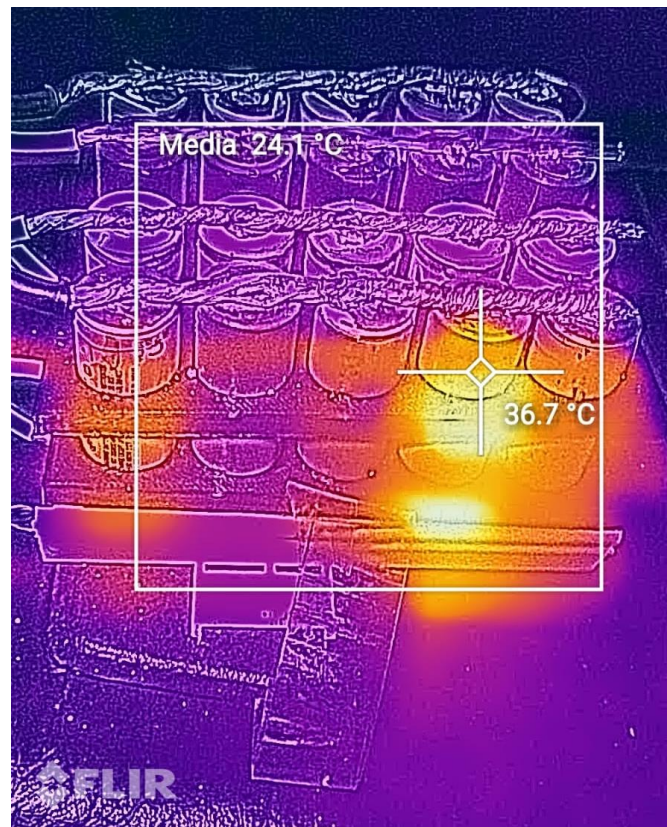


Figura 52. Imagen térmica después de 15 min.

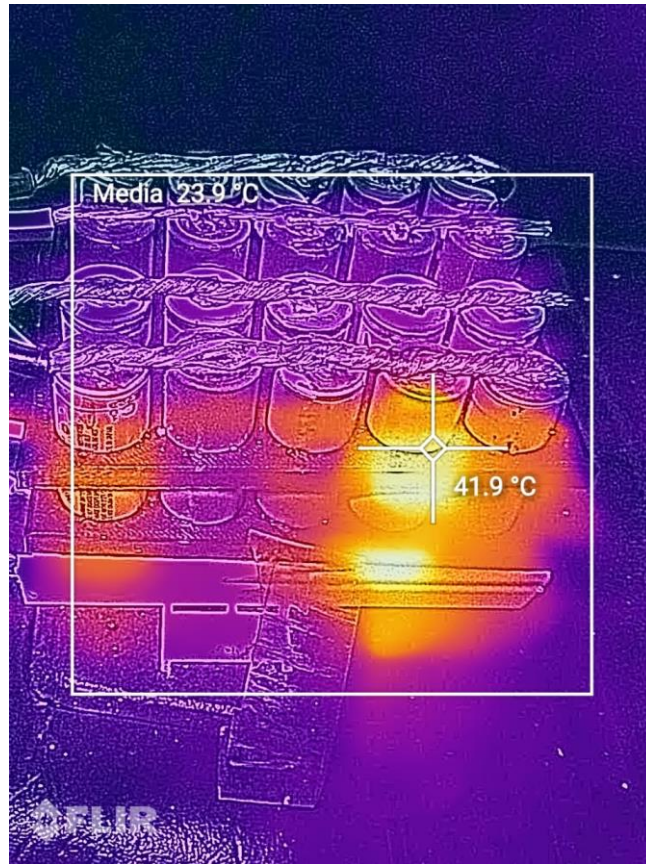


Figura 53. Imagen térmica después de 20 min.

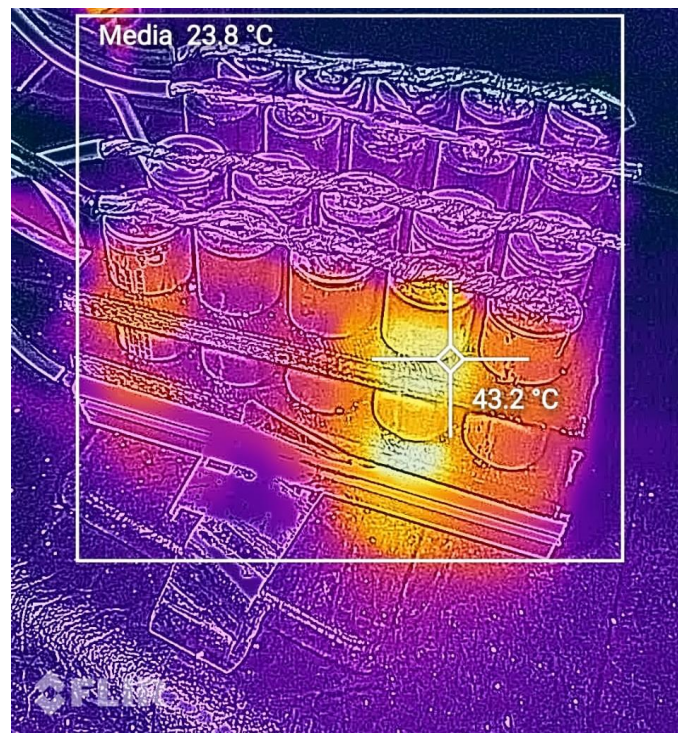


Figura 54. Imagen térmica después de 33 min.

Como se puede apreciar de las figuras anteriores, con el paso del tiempo se puede notar un evidente aumento de la temperatura. Una de las celdas es la que más rápido llega a una temperatura de 43.2°C. Por otro lado, las otras celdas se mantienen en una media de aproximadamente 23° C, lo cual se puede dar por la presencia del BMS. Con este resultado podemos saber que se usó una temperatura correcta de 44°C en la simulación como la temperatura máxima de las baterías. La celda con mayor temperatura podría ser una celda defectuosa que recibe más corriente por lo que se genera un incremento en su temperatura interna.

Por parte del BMS se pudo notar que durante la prueba no hubo ningún aumento de temperatura.



Figura 55. Imagen térmica del BMS.

Conclusiones

Una vez concluido el paquete de baterías, se pudo determinar que las baterías de litio, específicamente las celdas 18650 fueron la mejor opción pues cumplen con las condiciones de eficiencia, peso y seguridad requeridas. Las celdas probaron ser eficientes pues almacenan una favorable cantidad de carga en comparación a su tamaño. Adicionalmente, la capacidad que existe de conectar las celdas tanto en serie como en paralelo hace posible que estas puedan ser conectadas en función de lo que se necesite y así conseguir voltajes y capacidades altas capaces de proveer la energía necesaria efectivamente.

De igual manera, cada celda tiene un peso de aproximadamente de 45g, lo cual evidentemente refleja una ventaja absoluta en comparación a las otras baterías, que por lo general son de un tamaño mayor y de más peso. Siendo el proyecto de migración del motor de combustión a un motor eléctrico uno enfocado en máquinas móviles, el peso es un factor importante pues mientras menos peso se necesite mover se puede usar sistemas de potencia y energía más pequeños, que a su vez lo vuelve más seguro al usar menos energía. Como resultado se obtuvo que el banco de baterías, incluyendo la caja, pesa 3 kg (6.6 lb), lo que no representa un aumento alto en el peso al ser montado a la podadora. Sin embargo, es importante recalcar que también debería considerarse los pesos adicionales de montar a la podadora el inversor y el variador de frecuencia, que tienen pesos de 8.44 kg (18.6 lb) y de 1 kg (2.2 lb) respectivamente. Por lo tanto, el peso total de los elementos que deben ser montados en la podadora es de 12.44 kg, siendo esto aún un peso relativamente bajo que no afectaría en gran proporción al peso total de la podadora, ya que el peso del motor que se reemplazo es de 14 kg.

En el tema de seguridad, la presencia del BMS ayuda a controlar de mejor manera las condiciones de las baterías. Este circuito impreso es el que protege a las celdas de sobrecargas, cortocircuitos, protección de sobre corriente y sobre descarga. Adicionalmente ayuda a mantener un equilibrio entre las celdas para que estas operen de mejor manera. Otro aporte de seguridad es la instalación de un ventilador encargado del enfriamiento de las celdas. Un sobrecalentamiento de las celdas puede llevar a que estas disminuyan su vida útil y en caso de una temperatura extrema (mayor de 60°C) puede ser extremadamente peligroso y darse una explosión de la celda. Es por esta razón por la cual un ventilador que enfríe las celdas es una solución simple que cumple con la misión de proteger aún más las celdas. Este ventilador se encuentra montado al exterior de la caja metálica, que está hecha de láminas de tol de 1 mm de espesor. La caja externa también protege a las celdas de golpes y de punzadas que pueden ocasionar fugas térmicas y explosiones espontáneas de las celdas.

Otro resultado exitoso fue el cableado debido a que se utilizó cables que contaban con conectores. Estos conectores son de color rojo (positivo) y negro (negativo), lo cual ayuda a la clasificación de polos y cables de las celdas y así disminuir la probabilidad de hacer una conexión incorrecta. Estos conectores tienen sus terminales dentro de los plásticos, lo cual también ayuda a que evitar a que se dé un cortocircuito por accidente. Estos conectores también facilitan las conexiones entre los arreglos de celdas y también entre el banco de celdas y la carga o equipo a conectar.

Como resultado general, se enfrenta el problema de una mala planificación ya que se profundizo en la investigación y proceso de selección, dimensionamiento y conexiones para un proyecto específico. Esta investigación repercute en los costos, pues al ser un proceso planificado puede llegar a ser más barato y hacer que se utilicen menos recursos. Esto implica una mayor probabilidad de éxito. La construcción del banco de pruebas

permite obtener resultados para diferentes proyectos en los que este banco de baterías sea útil. Por lo que podría categorizarse como un banco “flexible” . Por otra parte, del prototipo final se puede apreciar que los componentes funcionan y trabajan en armonía.

Las limitaciones de este proyecto fueron dos. La primera fue el tema de las celdas, pues inicialmente, se buscaba hacer un banco con baterías nuevas para garantizar de esta forma que funcionen correctamente, sin embargo, en el mercado suelen haber imitaciones defectuosas que pueden resultar dañadas e inclusive peligrosas. Además, el costo de adquisición de baterías nuevas es relativamente caro, pues al ser un banco de 20 baterías el costo de este número de celdas es de doscientos dólares. Y la otra limitación surgió al momento de soldar y conectar los terminales de las celdas. En otros países existen mallas o tiras de níquel que están pensadas específicamente para que sirvan de uniones. Debido a la falta de este producto en el contexto nacional se utilizó el método tradicional de soldar los cables con un cautín y estaño.

Como sugerencias o trabajo futuro se pueden tomar distintas acciones. La primera es cambiar el proceso de suelda para las conexiones. Sería más viable la opción de importar las mallas de níquel así facilitar el proceso de suelda entre celdas. La segunda es que, si se cuenta con el presupuesto necesario, se podría comprar y reemplazar las celdas recicladas por celdas nuevas y originales que garanticen un mejor funcionamiento y que así también se pueda obtener una mayor fidelidad en los resultados. Y finalmente, dependiendo de la aplicación, se podría cambiar de sistema de refrigeración como enfriamiento por agua o con algún refrigerante que pase por un serpentín entre todas las baterías y que así se asegure de mejor manera el enfriamiento individual de cada celda.

Referencias Bibliográficas

- Buchmann, I. (2019). The High-Power Lithium-Ion: Types of lithium-ion batteries. *Figure 4: Energy densities of common batteries chemistries*. Recuperado desde: https://batteryuniversity.com/learn/archive/the_high_power_lithium_ion
- Dubaniewicz, T. H., & DuCarme, J. P. (2016). Internal short circuit and accelerated rate calorimetry tests of lithium-ion cells: Considerations for methane-air intrinsic safety and explosion proof/flameproof protection methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, 575–584. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2016.07.027>
- Dunlop, J. (2010). Photovoltaic Systems. Second Edition. *National Joint Apprenticeship and Training Committee for the Electrical Industry*. American Technical Publishers ATP:United States of America. ISBN 978-0-8269-1308-1
- ELCO Propulsion. (2019). Electric Outboard 14 hp. Recuperado desde: <https://www.elcomotoryachts.com/ep-14-outboard/>
- EVTV Motor Verks. (2019). Tesla Model S Battery Module. Recuperado desde: <http://store.evtv.me/proddetail.php?prod=TeslaBattModule>
- Galco. (2019). KBVF-27 Adjustable Frequency Drive. Recuperado desde: <https://www.galco.com/buy/KB-Electronics/KBVF-27>
- Giancolli, D. (2009). Capítulo 30: Inductancia, oscilaciones electromagnéticas y circuitos ca. *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. Cuarta Edición. Pearson Educación: México. ISBN:978-607-442-303-7.
- Gorter, T., Voerman E., Joore, P., Reinders, A., & Van Houten, F. (2010). PV-boats: Design issues in the realization of PV powered boats. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Recuperado desde: https://www.researchgate.net/publication/266839073_PV-boats_design_issues_in_the_realization_of_PV_powered_boats
- Hofmann, A., Uhlmann, N., Ziebert, C., Wiegand, O., Schmidt, A., & Hanemann, T. (2017). Preventing Li-ion cell explosion during thermal runaway with reduced pressure. *Applied Thermal Engineering*, 124, 539–544. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.056>
- Incropera, F; Dewitt, D; Lavine, A & Bergman, T. (2011). *Fundamental of Heat Transfer and Mass Transfer*. Seventh Edition. John Wiley & Sons, Inc:United States of America
- Less, G. [Michigan Engineering] (2016). Lithium Ion Batteries: Why They Explode [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=D3GDdZkN6fg>

- May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157.
<https://doi.org/10.1016/J.EST.2017.11.008>
- Nasirudin, A., Chao, R., Aria, I. K., & Utama, P. (2017). Solar Powered Boat Design Optimization. *Procedia Engineering*, 194, 260–267.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.144>
- N/D. (2019). Cooling of li 18650 4*4 cells.Public Projects.SimScale. Recuperado desde:
https://www.simscale.com/workbench/?pid=7156123073413573155&rru=1ec9341d-6fa5-4286-918f-6582682ed153&ci=51250462-ae9f-4681-8e96-c4c54a5abae2&ct=POST_PROCESSOR_SCREENSHOT&mt=SIMULATION_RESULT&ssid=c5b66731-f30e-4e04-8521-c25ec07a2b6d
- N/D. (2019).Datos y especificaciones para celdas 18650. Recuperado desde:
https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-422197595-baterias-samsung-18650-100-originales-para-vaporizadores-_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking_id=18b32286-ab6a-4f6d-ae28-f00ff058513d
- N/D. (2019).Datos y especificaciones para BMS. Recuperado desde:
https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-423363723-cargador-bms-modulo-148v-168v-4s-30a-li-ion-bateria-18650-_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking_id=5ff3ba80-5849-4031-afb6-63ad5981ccc4
- N/D. (2019).Kilowatts to amps calculator.Rapid Table. Recuperado desde:
https://www.rapidtables.com/calc/electric/kW_to_Amp_Calculator.html
- N/D. (2019).VFD para corregir factor de potencia. MyG Inc. Recuperado desde:
<https://motoresygeneradores.com/vfd-para-corregir-el-factor-de-potencia/>
- N/D. (s/f).Tensiones e intensidades en el estatór de los motores trifásicos. Capitulo 11: Motores Trifásicos. Recuperado desde:
<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>
- Nieto, N., Díaz, L., Gastelurrutia, J., Blanco, F., Carlos, J., & Rivas, A. (2014). Novel thermal management system design methodology for power lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 272, 291–302.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.169>
- Saiz, Ma. Jesus (s/f). Conexión y arranque del motor. Tema 11: Motores de corriente alterna. *Tecnología Industrial II*. Departamento de tecnología. Recuperado desde:
http://ies.almudena.madrid.educa.madrid.org/dpto_tecnologia/TI_2_distancia/T11_motores_ca.pdf
- Si, R. J., Liu, D. Q., & Xue, S. Q. (2018). Experimental Study on Fire and Explosion Suppression of Self-ignition of Lithium Ion Battery. *Procedia Engineering*, 211,

629–634. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.057>

Tripp-Litt. (2019). Inversor/Cargador Serie APS X de 750W, 12VCD y 230V CA con Conmutación de Transferencia Automática, 2 tomacorriente C13. Recuperado desde: <https://www.tripplite.com/inversor-cargador-750w-conmutaci%C3%B3n-de-transferencia-autom%C3%A1tica-2x-tomacorrientes-c13~APSX750>

Turmo, E. (s.f). NTP 617: Locales de caga de baterías de acumuladores eléctricos de ploco-ácido sulfúrico. *Ministerio de Trabajo de Asuntos Sociales España. Insitituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*. Recuperado desde: https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_617.pdf

Wang, Y., Moura, S. J., Advani, S. G., & Prasad, A. K. (2019). Power management system for a fuel cell/battery hybrid vehicle incorporating fuel cell and battery degradation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(16), 8479–8492. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.02.003>

Warner, J. (2015). *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Type and Terminology*. Midland, Mi, USA:ELSEVIER. ISBN: 978-0-12-801456-1

Zhang, X.-Q., Zhao, C.-Z., Huang, J.-Q., & Zhang, Q. (2018). Recent Advances in Energy Chemical Engineering of Next-Generation Lithium Batteries. *Engineering*, 4(6), 831–847. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2018.10.008>

Anéxos

A. Análisis de Riesgo

A.1 Tabla de riesgos.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Baterías no esten en buen estado | No obtener los elementos necesario a tiempo |
| Malas conexiones de los elementos | Sobrevoltaje o sobrecorriente y daño de componentes |

A.2 Tabla cualitativa de riesgos.


| | | | | |
|---------|--------|--------------|-------|------|
| Impacto | Severo | | | |
| | Medio | | | |
| | Bajo | | | |
| | Nulo | | | |
| | | Bajo | Medio | Alto |
| | | Probabilidad | | |

A.3 Tabla cuantitativa de riesgos.

| | | | | | | |
|---------|---|--------------|---|---|---|---|
| Impacto | 5 | | | | | |
| | 4 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 1 | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | Probabilidad | | | | |

B. Informes Térmicos FLIR

B.1 Informe 1

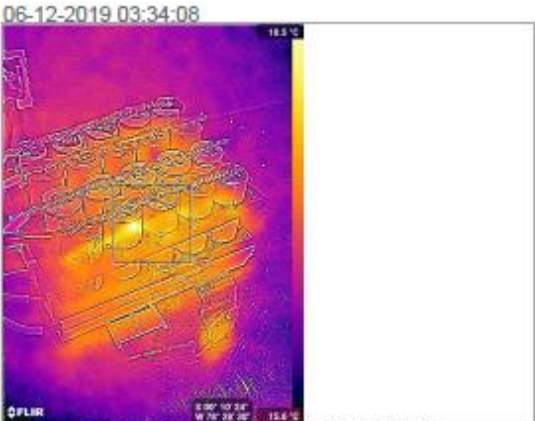


Informe de imagen térmica FLIR

Mediciones (°C)

| | | |
|----------|-------|------|
| Recuadro | Máx. | 18.5 |
| | Mín. | 17.2 |
| | Media | 17.5 |

06-12-2019 03:34:08




Parámetros

| | |
|-------------------|---------------|
| Emisividad | 0.90 |
| Temp. refl. | 25.00 °C |
| Distancia | 1.00 m |
| Humedad relativa | 50.00 % |
| Temp. atmosférica | 20.00 °C |
| Transmisión | 0.00 |
| Temp. ventana IR | 27.45 °C |
| Trans. ventana IR | 0.82 |
| Latitud | S 00° 10' 24" |
| Longitud | W 78° 28' 30" |

Latitud: S 00° 10' 24", Longitud: W 78° 28' 30"
f98ecb41ac8a324175c09b81fecce724.jpg

06-12-2019 03:34:08



Latitud: S 00° 10' 24", Longitud: W 78° 28' 30"

B.2 Informe 2



Informe de imagen térmica FLIR

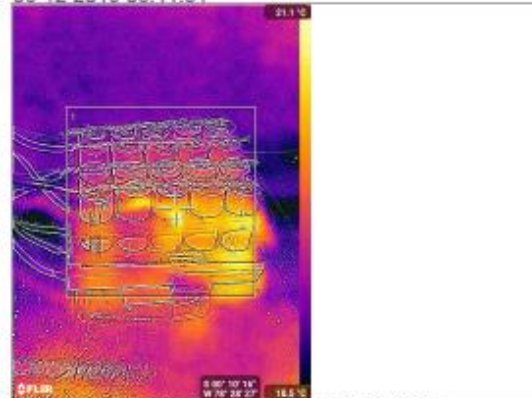
Mediciones (°C)

| | | |
|----------|-------|------|
| Punto | | 20.5 |
| Recuadro | Máx. | 21.1 |
| | Mín. | 18.6 |
| | Media | 19.7 |

Parámetros

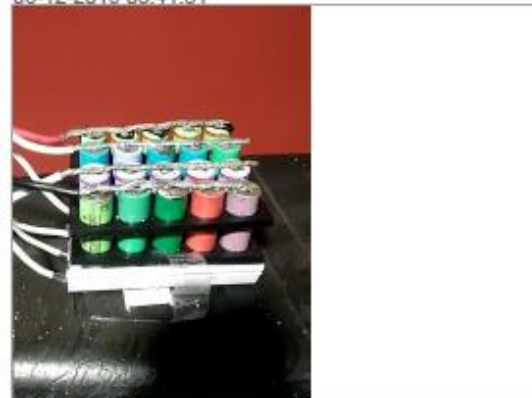
| | |
|-------------------|---------------|
| Emisividad | 0.90 |
| Temp. refl. | 25.00 °C |
| Distancia | 1.00 m |
| Humedad relativa | 50.00 % |
| Temp. atmosférica | 20.00 °C |
| Transmisión | 0.00 |
| Temp. ventana IR | 34.75 °C |
| Trans. ventana IR | 0.82 |
| Latitud | S 00° 10' 16" |
| Longitud | W 78° 28' 27" |

06-12-2019 03:41:51



Latitud: S 00° 10' 16", Longitud: W 78° 28' 27"
fa45be0ed09759b1e580428b0ffa46b4.jpg

06-12-2019 03:41:51



Latitud: S 00° 10' 16", Longitud: W 78° 28' 27"

B.3 Informe 3

Informe de imagen
térmica FLIR

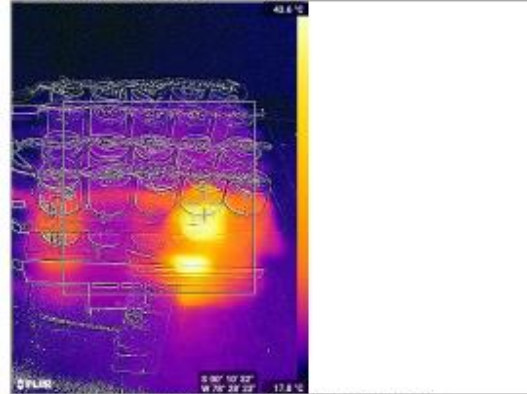
Mediciones (°C)

| | | |
|----------|-------|------|
| Punto | | 36.7 |
| Recuadro | Máx. | 43.6 |
| | Mín. | 18.2 |
| | Media | 24.1 |

Parámetros

| | |
|-------------------|---------------|
| Emisividad | 0.90 |
| Temp. refl. | 25.00 °C |
| Distancia | 1.00 m |
| Humedad relativa | 50.00 % |
| Temp. atmosférica | 20.00 °C |
| Transmisión | 0.00 |
| Temp. ventana IR | 33.17 °C |
| Trans. ventana IR | 0.82 |
| Latitud | S 00° 10' 32" |
| Longitud | W 78° 28' 23" |

06-12-2019 04:08:11



Latitud: S 00° 10' 32", Longitud: W 78° 28' 23"
1539fa365adffbdede11beea996e8698.jpg

06-12-2019 04:08:11



Latitud: S 00° 10' 32", Longitud: W 78° 28' 23"

B.4 Informe 4



Informe de imagen térmica FLIR

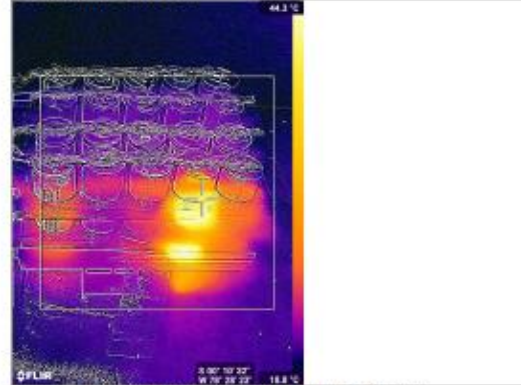
Mediciones (°C)

| | | |
|----------|-------|------|
| Punto | | 41.9 |
| Recuadro | Máx. | 44.5 |
| | Mín. | 18.8 |
| | Media | 23.9 |

Parámetros

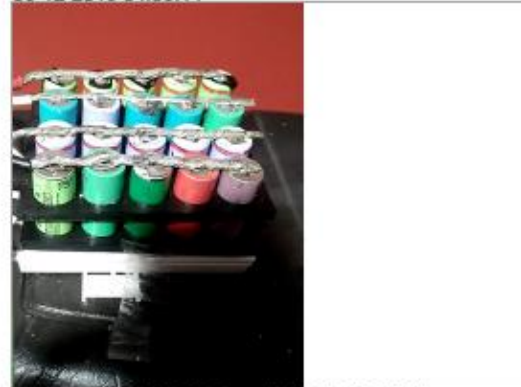
| | |
|-------------------|---------------|
| Emisividad | 0.90 |
| Temp. refl. | 25.00 °C |
| Distancia | 1.00 m |
| Humedad relativa | 50.00 % |
| Temp. atmosférica | 20.00 °C |
| Transmisión | 0.00 |
| Temp. ventana IR | 33.50 °C |
| Trans. ventana IR | 0.82 |
| Latitud | S 00° 10' 32" |
| Longitud | W 78° 28' 23" |

06-12-2019 04:08:11



Latitud: S 00° 10' 32", Longitud: W 78° 28' 23"
6870f02ee7aec5e03079fb3c9542f00e.jpg

06-12-2019 04:08:11



Latitud: S 00° 10' 32", Longitud: W 78° 28' 23"

B.5 Informe 5



Informe de imagen térmica FLIR

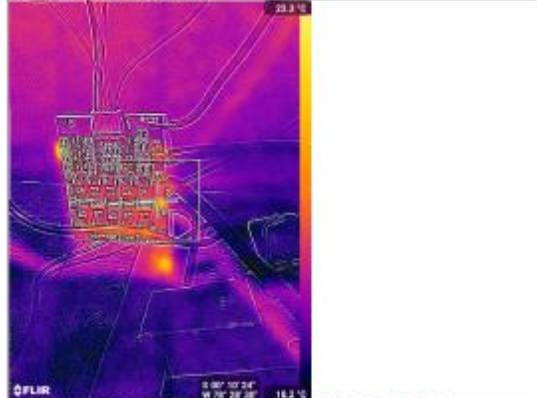
Mediciones (°C)

| | | |
|----------|-------|------|
| Punto | | 21.0 |
| Recuadro | Máx. | 21.2 |
| | Mín. | 18.7 |
| | Media | 19.6 |

Parámetros

| | |
|-------------------|---------------|
| Emisividad | 0.90 |
| Temp. refl. | 25.00 °C |
| Distancia | 1.00 m |
| Humedad relativa | 50.00 % |
| Temp. atmosférica | 20.00 °C |
| Transmisión | 0.00 |
| Temp. ventana IR | 30.90 °C |
| Trans. ventana IR | 0.82 |
| Latitud | S 00° 10' 24" |
| Longitud | W 78° 28' 30" |

06-12-2019 03:34:08



Latitud: S 00° 10' 24", Longitud: W 78° 28' 30"
c2ad2d4fcb3d6d9889305caa033019c0.jpg

06-12-2019 03:34:08



Latitud: S 00° 10' 24", Longitud: W 78° 28' 30"

C. Posibles modelos para Inversor y Variador de Frecuencia.

C.1 Inversor Tripp-Lite 12VDC-230V AC



| GENERALIDADES | |
|---|---|
| Código UPC | 037332121622 |
| SALIDA | |
| Compatibilidad de Frecuencia | 50 Hz |
| Salida de Onda Sinusoidal Pura | No |
| Salida (Watts) | 750 |
| Voltaje(s) Nominal(es) de Salida Soportado(s) | 230V |
| Tomacorrientes | (2) Tomacorrientes universales |
| Capacidad de Salida Continua (Watts) | 750 |
| Capacidad de Salida Máxima (Watts) | 1500 |
| Regulación de voltaje de salida | TENSIÓN DE LÍNEA (CA): Mantiene una salida de onda sinusoidal nominal de 230V desde la alimentación de tensión de línea. TENSIÓN DEL INVERSOR (CA): Mantiene tensión de salida de onda sinusoidal PWM de 230 VCA (+/-5%). |
| Regulación de Frecuencia de Salida | 50 Hz (+/- 0,3 Hz) |
| Protección contra Sobrecargas | Incluye disyuntor de entrada de 3A dedicado al sistema de carga y disyuntor de salida de 4A para las cargas de salida de CA. |

| FÍSICAS | |
|--|---|
| Método de Enfriamiento | Ventilador de varias velocidades |
| Factores de forma soportados | Las ranuras de montaje permiten la colocación permanente del APSX750 sobre cualquier superficie horizontal (consulte el manual para obtener información adicional sobre el montaje) |
| Material de Construcción | Policarbonato |
| Dimensiones de Envío (Al x An x Pr / cm) | 31.50 x 26.67 x 27.18 |
| Dimensiones de Envío (Al x An x Pr / pulgadas) | 12.40 x 10.50 x 10.70 |
| Peso de Envío (kg) | 9.30 |
| Peso de Envío (lb) | 20.50 |
| Dimensiones de la Unidad (Al x An x Pr / cm) | 17.78 x 22.23 x 22.86 |
| Dimensiones de la Unidad (Al x An x Pr / pulgadas) | 7 x 8,75 x 9 |
| Peso de la Unidad (kg) | 8.44 |
| Peso de la Unidad (lb) | 18.6 |

Recuperado desde: <https://assets.tripplite.com/product-pdfs/es/apsx750.pdf>

C.2 Variador de frecuencia 230VAC 1-Phase Input 230 VAC 3-Phase Output

KBVF

Hybrid AC Drive

A Digital Drive with Analog Interface

IP-20 Enclosure

Primary Features

Horsepower 1/8 to 5 HP, Jumper Selectable
 1Ø & 3Ø Input 115/230/460 VAC, 50/60 Hz
 3Ø Output 230/460 VAC
 200% Starting Torque
 Power & Status Indicators

Benefits

Saves Time

Easy to Install and Simple to Operate
 Does not require programming
 or commissioning
Up and running in less than 10 minutes.

Motors Last Longer

Proprietary CL Software
 Provides overload protection,
 prevents motor burnout
 and eliminates nuisance tripping.
 UL approved as electronic overload
 protector for motors.

Energy Saving

Uses only the power the application requires
*Energy savings is realized by using variable motor speed
 vs. constant speed motors.*



230 VAC 1-Phase Input • 230 VAC 3-Phase Output

| Model No. | Part No. | Ratings | | Dimensions – Inches (mm) | | | Net Weight | |
|-----------|----------|-------------|------|--------------------------|------------|------------|------------|-----|
| | | HP, (kW) | Amps | Width | Length | Height | Lbs. | kg |
| KBVF-23 | 9958 | 1/2, (0.37) | 2.4 | 3.9, (99) | 4.3, (109) | 2.75, (70) | 1.3 | 0.6 |
| KBVF-24 | 9978 | 1, (0.75) | 4.0 | 4.7, (119) | 4.3, (109) | 5, (127) | 2.2 | 1.0 |

Recuperado desde: https://www.galco.com/techdoc/kb/kbvf-27_dat.pdf