



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño del banco de baterías
para el vehículo eléctrico
FSAE UM-E3**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

David Alfonso Zorrilla Gasca

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Mariano García del Gállego



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

*Para mi familia y particularmente
a mi amigo Frisky que siempre estuvo ahí para mí.*

*Gracias a los integrantes de UNAM Motorsports, asesores de la FI,
patrocinadores y amigos por hacer todo esto posible.*

Contenido

1. ANTECEDENTES	6
1.1 OBJETIVO.....	6
1.2 INTRODUCCIÓN A LA COMPETENCIA DE FSAE ELECTRIC.....	6
1.3 TEMPORADAS 2017-2020	11
1.4 REGLAMENTO	12
1.5 GLOSARIO	14
2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 INTERACCIÓN DEL ACUMULADOR CON EL TREN DE POTENCIA	16
2.2 CÁLCULO DE CAPACIDAD	18
2.3 FACTORES POR CONSIDERAR PARA SELECCIÓN DE COMPUESTOS DE BATERÍAS	23
2.4 CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	28
3. MÓDULOS DE CELDAS.....	31
3.1 ARREGLO EN SERIE Y PARALELO	31
3.2 SELECCIÓN DE GEOMETRÍA DE CELDAS	32
3.3 SUJECIONES.....	34
3.4 CONEXIONES	35
3.5 BMS	39
4. ACUMULADOR	46
4.1 GEOMETRÍA.....	46
4.2 MATERIALES Y MÉTODO DE MANUFACTURA	48
4.3 SUJECIONES A CHASIS.....	49
4.4 MANTENIMIENTO	50
4.5 AISLAMIENTO DEL MEDIO	51
4.6 ENFRIAMIENTO	52
5. CIRCUITOS DE ALTO VOLTAJE.....	54
5.1 CIRCUITOS DE PRECARGA Y DESCARGA	54
5.2 FUSIBLE GENERAL.....	55
5.3 CONECTORES Y DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD	56
5.4 HVD	58
6. INSTRUMENTACIÓN Y SEGURIDAD	60
6.1 SEÑALES DEL BMS	60
7. PLANES A FUTURO	69
8. CONCLUSIONES.....	70
9. BIBLIOGRAFÍA.....	72
10. ANEXOS	73

10.1 FOTOS DE MANUFACTURA DEL ACUMULADOR	73
10.2 CÁLCULO DE CAPACIDAD PARA UNA RECTA Y UNA CURVA	76
10.3 ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO DE PRECARGA Y DESCARGA	77
10.4 CURVA DEL FUSIBLE GENERAL	78

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1, Prototipos eléctrico y de combustión interna, CDMX, 2018	9
Ilustración 2, Organigrama de la escudería	10
Ilustración 3, Diagrama de bloques del tren de potencia	16
Ilustración 4, Circuito de resistencia dividido en secciones.....	21
Ilustración 5, Energía vs. potencia específica, varios compuestos (CALCE, 2017).....	24
Ilustración 6, Resultado de matriz de decisión para compuesto.....	26
Ilustración 7, Resultado de matriz de decisión para producto	27
Ilustración 8, Efecto de la temperatura sobre los ciclos de vida a 1C de descarga	29
Ilustración 9, Localización de orificio de ventilación	30
Ilustración 10, Curvas de descarga de la batería a diferentes temperaturas.....	32
Ilustración 11, Vista inferior del chasis conteniendo al acumulador	33
Ilustración 12, Estructura o "canasta" de las baterías	35
Ilustración 13, Cuatro celdas conectadas en serie (A123 Systems, 2015).....	36
Ilustración 14, Estructura con tapas sujetando pestañas de las celdas en la parte superior.	37
Ilustración 15, Detalle de como quedan aprisionadas las pestañas	37
Ilustración 16, Vista superior que muestra conexión única de los segmentos.....	38
Ilustración 17, Conectores modificados con geometrías y colores diferentes	38
Ilustración 18, Orion BMS en dos vistas	39
Ilustración 19, Esquemático general del Orion BMS (Orion, 2014)	41
Ilustración 20, Bloques con grupos y subgrupos de "voltaje taps" en la parte inferior (Orion, 2014).....	41
Ilustración 21, Conexión normal de "voltage taps" (Orion, 2014)	42
Ilustración 22, Desconexión de "voltage taps" (Orion, 2014)	42
Ilustración 23, Conexión incorrecta, conducción en diodo Zener (Orion, 2014)	43
Ilustración 24, Cavidades para termistores integradas en la tapa inferior	44
Ilustración 25, Vista lateral que muestra espacio para "voltage tap" y termistor.....	45
Ilustración 26, Pieza para mejorar distribución de cableado	45
Ilustración 27, Estructura del acumulador.....	47
Ilustración 28, Interior del acumulador, conectores en parte frontal y lateral.....	47
Ilustración 29, Interior del acumulador, secciones inferior y superior	48
Ilustración 30, Sujeciones cómicas en la parte lateral del acumulador.....	50
Ilustración 31, Circuito de funcionamiento de ventiladores (Orion, 2014).....	53
Ilustración 32, Fisible general dentro de estructura diseñada	55
Ilustración 33, Explosivo de acumulador, conectores de LV en verde y gris	56
Ilustración 34, Vista superior de sección de control, conector de HV en naranja	57
Ilustración 35, HVD de tipo rotatorio	59
Ilustración 36, Conector del BMS conteniendo diferentes señales.....	60
Ilustración 37, Sensor de corriente	64
Ilustración 38, Cargador de baterías.....	68

1. Antecedentes

1.1 Objetivo

Diseñar el banco de baterías del auto tipo fórmula UM-E3 con tracción trasera de la escudería UNAM Motorsports de la Facultad de Ingeniería.

1.2 Introducción a la competencia de FSAE Electric

Formula SAE es una competencia a nivel universitario organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices, SAE por sus siglas en inglés. Dicha competencia tiene el objetivo de poner a prueba las habilidades de estudiantes de licenciatura y maestría a través del diseño, construcción y pruebas de un auto tipo fórmula.

Convencionalmente existen dos ramas de competencias dentro de Formula SAE que se han ido desarrollando durante los últimos años: prototipo de combustión interna y prototipo eléctrico. La primera competencia oficial, cuando solamente existía la rama de combustión interna, se llevó a cabo en la Universidad de Texas en Austin en 1981 con la participación módica de 6 equipos y un reglamento rudimentario de apenas un par de páginas. Por otro lado, la rama eléctrica dio sus primeros pasos durante el verano de 2013 en California, contando con la participación de 30 equipos.

Con el paso del tiempo, la competencia ha ido expandiendo a otros países e incluso continentes, llegando a un total de más de 20 eventos anuales a nivel mundial. En América del Norte existen tres sedes oficiales: Michigan y

California en Estados Unidos y Ontario en Canadá. Asimismo, el número de equipos se ha ido incrementando con el tiempo. La última competencia de Michigan de la rama de combustión interna contó con la participación de 120 equipos y 2567 estudiantes, sin mencionar a las decenas de jueces, patrocinadores, voluntarios y autoridades de la asociación.

Contrario a las competencias profesionales, en estas no se evalúan solamente aspectos estéticos o velocidad de los vehículos, sino que existen una serie de pruebas denominadas “estáticas” y “dinámicas” como se muestra a continuación:

Pruebas	Nombre	Descripción	Puntuación
Estáticas	Reporte de costos	Evalúa la habilidad del equipo de gestionar un proyecto. Se analiza la capacidad de toma de decisiones para balancear el costo y desempeño para cada parte y ensamble del auto.	100
	Presentación de diseño	Evalúa el esfuerzo dedicando al auto de manera ingenieril y como se lograron los objetivos en términos de desempeño.	150
	Caso de negocios	Evalúa la capacidad del equipo de desarrollar y exponer un caso de negocios tomando en cuenta	75

		factores de producción, logística, marketing y consideraciones técnicas para poder atraer inversión al proyecto.	
Dinámicas	Aceleración	Evalúa la aceleración del vehículo en una línea recta de pavimento con una longitud de 75 metros.	100
	Autocross	Evalúa la maniobrabilidad y manejo del vehículo en un circuito complejo con rectas y curvas. La velocidad promedio debe mantenerse entre 40 y 48 km/hr.	125
	Skid Pad	Evalúa la maniobrabilidad del vehículo al momento de tomar curvas en un circuito en forma de "8".	75
	Resistencia	Evalúa el desempeño general del vehículo en un recorrido de 22 km. Se analiza también la confiabilidad y durabilidad de este.	275
	Eficiencia de combustible	Evalúa el uso de combustible/energía utilizada para completar la prueba de resistencia.	100

Total	1000
--------------	------

Al completar todos los eventos, existen premiaciones para los primeros lugares de cada prueba y para los equipos con mayor puntuación ponderada.

La Facultad de Ingeniería de la UNAM participa con la escudería de UNAM Motorsports desde 2010 con el prototipo de combustión interna. A partir de 2017 se empezó a desarrollar en paralelo el vehículo eléctrico, del cual han existido tres modelos. Los primeros dos se han quedado en etapas de diseño y banco de pruebas, por lo que el UM-E3 es el primer prototipo funcional desarrollado por la escudería.



Ilustración 1, Prototipos eléctrico y de combustión interna, CDMX, 2018

El organigrama del equipo se muestra a continuación:

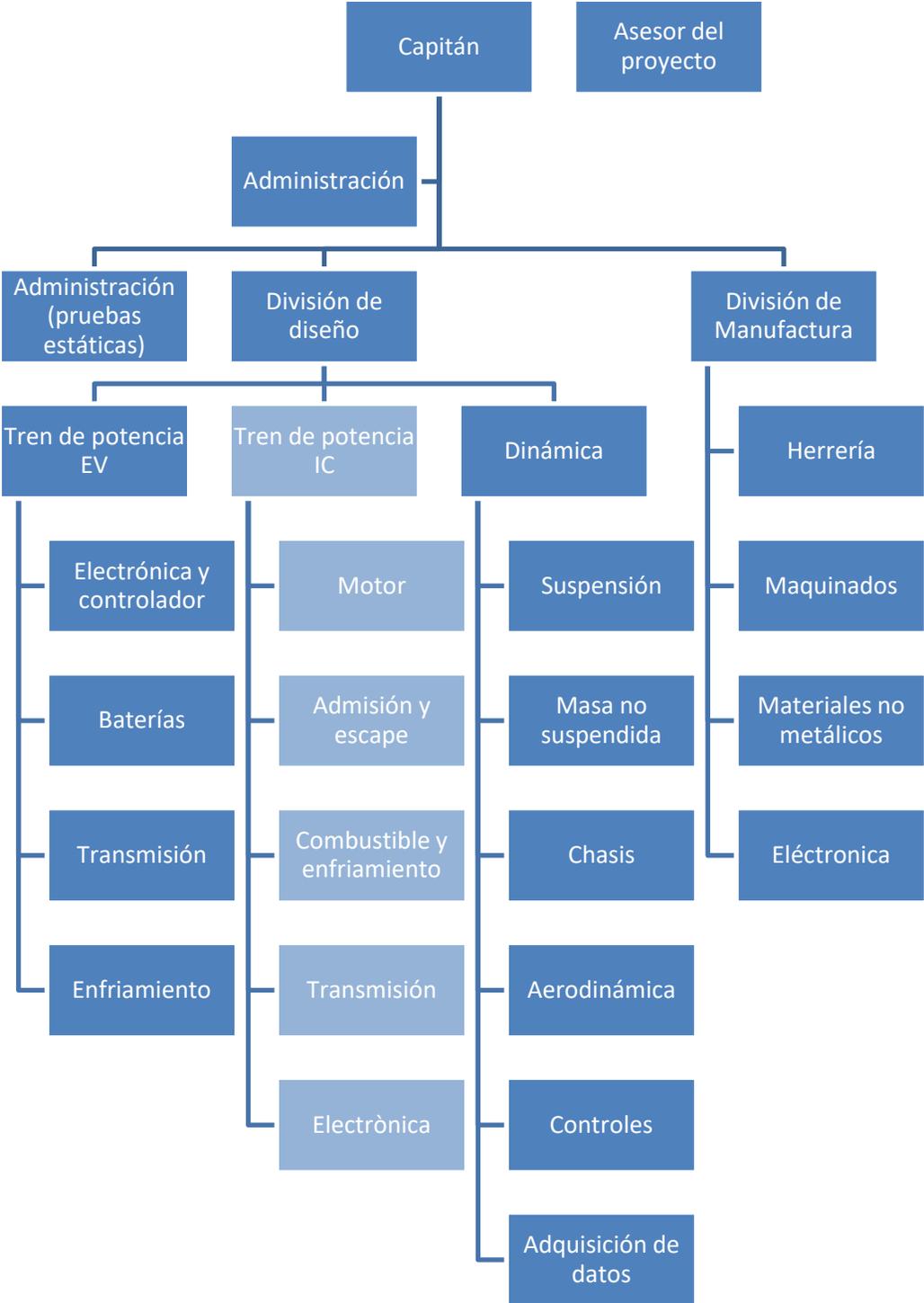


Ilustración 2, Organigrama de la escudería

1.3 Temporadas 2017-2020

El primer vehículo eléctrico de la escudería UNAM Motorsports fue diseñado y manufacturado durante la temporada 2017. Se reacondicionaron y se utilizaron la mayoría de los componentes dinámicos tales como chasis, masas no suspendidas, cabina etc., del prototipo de combustión interna de la temporada inmediata anterior. Las principales partes del tren de potencia como el controlador, baterías, relevadores, etc., se fueron escogiendo según el conocimiento empírico que se iba recabando al estudiar otras escuderías participantes de la competencia e investigaciones específicas de los miembros del equipo.

El prototipo UM-E1 fue probado en dos ocasiones, con lo cual se obtuvieron algunos datos que sirvieron para el diseño del UM-E2. Partiendo de estos datos y todas las lecciones aprendidas, se comenzó el diseño del segundo prototipo, siendo este el primero que contaría con un desarrollo completamente desde cero. Aunque se trabajó varios meses en diseño y primeras etapas de manufactura, el equipo atravesó algunas complicaciones financieras, por lo que el auto no pudo construirse en su totalidad.

Las temporadas 2019 y 2020 se vieron beneficiadas por la incorporación de un número considerable de personas con conocimientos abundantes afines al proyecto. Este nuevo equipo se apoyó en toda la experiencia recaudada hasta el momento para lograr desarrollar en su totalidad el prototipo UM-E3, siendo este el primer vehículo eléctrico en ser diseñado, manufacturado y probado por la escudería.

Al inicio de la temporada se propusieron diferentes objetivos para cada uno de los sistemas del vehículo. De forma particular los objetivos relevantes para el acumulador fueron:

- Lograr una autonomía de 23 km (terminar la prueba de resistencia)
- Mantener las celdas en una temperatura de operación entre 32 y 40 grados

1.4 Reglamento

La competencia se rige por un reglamento que se actualiza al inicio de cada temporada. Este documento, además de parametrizar los métodos de evaluación de las pruebas mencionadas anteriormente, establece limitaciones y restricciones para el desarrollo del vehículo tipo fórmula. Cabe mencionar que, aunque algunas de estas son compartidas para las ramas de combustión interna y eléctrico, existen muchas más consideraciones de seguridad para el segundo tipo. Entre las más importantes se encuentran las siguientes:

- La potencia máxima tomada del acumulador no debe exceder los 80 kW.
- La diferencia de potencial medida en cualquier punto del vehículo no debe ser mayor a 600 V DC.
- El acumulador debe poder ser removido del vehículo para inspección, carga y mantenimiento.

- Todas las baterías deben contenerse en segmentos particulares del acumulador y cada segmento debe cumplir las siguientes dos consideraciones:
 - Un segmento no puede exceder 120 V DC
 - Un segmento no puede exceder 6 MJ
- Estos segmentos deben estar aislados entre ellos y del medio con algún material adecuado (el aire no es considerado un material dieléctrico adecuado).
- Un switch de seguridad para alto voltaje “HVD” (High Voltage Disconnect por sus siglas en inglés) debe ir acoplado a uno o ambos polos del acumulador.
- El acumulador debe incorporar un indicador que esté encendido permanente mientras exista alto voltaje en el mismo, es decir, más de 60 V DC.
- Un sistema de monitoreo de baterías (BMS por sus siglas en inglés) debe revisar constantemente la diferencia de potencial y temperatura en las celdas durante su uso y carga.
- La diferencia de potencial en cada celda no debe estar fuera de rango al establecido en la hoja de datos del fabricante.
- La temperatura debe ser medida en al menos 20% de las celdas y esta no debe estar fuera de rango al establecido en la hoja de datos del fabricante o mayor a 60° C, lo que sea menor.

- Las conexiones del sistema de tracción deben utilizar un cable calibre 4 AWG de color naranja.

Existe una inspección técnica que puede dividirse de manera general en dos grandes eventos. El primero se trata de una revisión exhaustiva del auto completo. Particularmente, parte de esta valoración incluye abrir el acumulador. En este paso, los jueces revisarán que el reglamento se cumpla adecuadamente, pero también juzgarán el sistema en base a su conocimiento y experiencia. Si los jueces dan el visto bueno en esta primera parte, el prototipo se someterá a otra prueba que consiste en encenderlo y mojarlo durante 120 segundos simulando una situación de lluvia. Después de esto se deja reposar otros 120 segundos esperando que no exista problema alguno y que este siga encendido. Si el auto falla, se debe trabajar en el problema hasta poder finalizar la inspección técnica.

Existen algunas otras reglas respecto a otros componentes del tren de potencia que involucran al acumulador. Estas se irán mencionando conforme sea necesario para una mejor comprensión del diseño del sistema.

1.5 Glosario

DC: corriente directa

AC: corriente alterna

EV: vehículo eléctrico

IC: combustión interna

V: volts

A: amperes

MJ: mega Joules

J: Joules

HV: alto voltaje

LV: bajo voltaje

DTC: código de diagnóstico de problemas

AWG: Calibre de alambre estadounidense

2. Marco teórico

2.1 Interacción del acumulador con el tren de potencia

Los componentes del tren de potencia de un vehículo eléctrico pueden clasificarse en tres grandes grupos según su función.

- Almacenamiento de energía (color verde)
- Sistema motriz (color naranja)
- Sistema mecánico (color rojo)

En el diagrama de bloques siguiente se puede apreciar, de forma concreta, la interacción existente entre los componentes del tren de potencia.

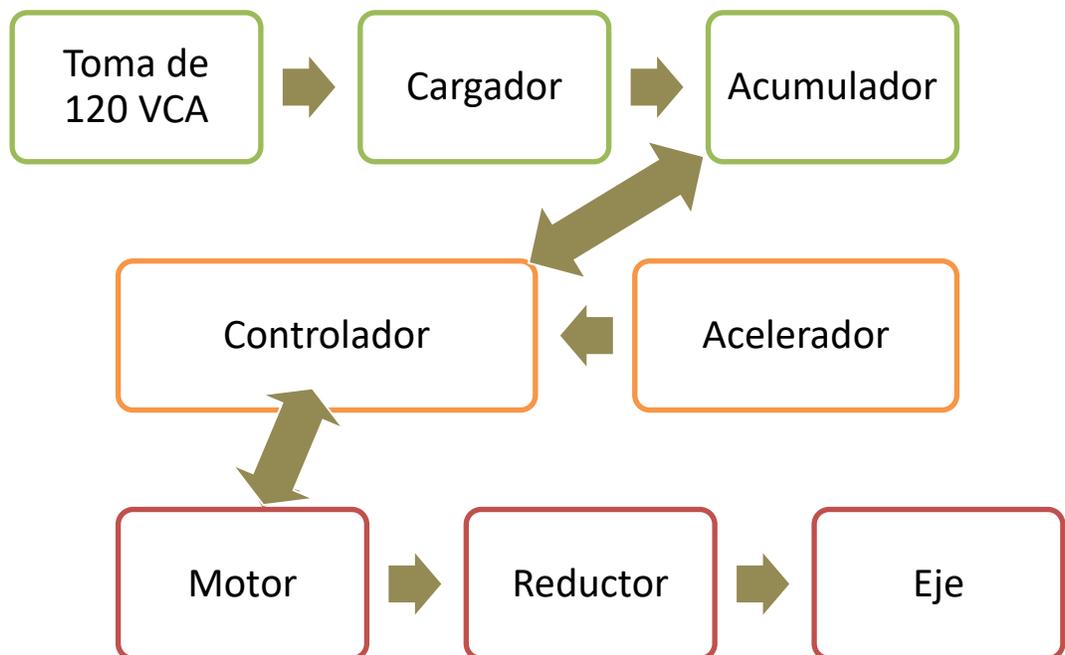


Ilustración 3, Diagrama de bloques del tren de potencia

Podemos observar que el acumulador es el último elemento del grupo de almacenamiento de energía y será el que se encargue de suministrar la misma al controlador. Es aquí donde se dará una transformación de DC a AC, ya que, en nuestro caso, utilizaremos sobre un motor trifásico.

Por cuestiones prácticas, la división del Tren de Potencia del auto eléctrico se encuentra partida en los siguientes sistemas:

- Baterías
- Transmisión y motor
- Controlador y seguridad.
- Enfriamiento

El sistema de Baterías interactúa directamente con los sistemas de Transmisión y motor y Controlador y seguridad. En términos generales, toda la parte de HV del acumulador está ligado al primer sistema, mientras que el LV y los arneses, se trabajarán en conjunto con el segundo.

En el diseño actual, el acumulador no es enfriado por el mismo circuito que trabaja con el motor y el controlador, por lo que no interactuamos directamente con el sistema de “enfriamiento”. Se utilizan algunos ventiladores para enfriar las baterías, pero estos siguen formando parte de nuestro sistema.

En cuanto a la parte de sujeciones al resto del vehículo, se trabaja en conjunto con el sistema de chasis de la división de Dinámica.

2.2 Cálculo de capacidad

Resulta de suma importancia realizar un cálculo de la capacidad energética necesaria en el acumulador para terminar la prueba más larga. Esta sería la de resistencia, que consiste en recorrer 22 km de forma continua. Este cálculo se abordó por la teoría, pero también se tomaron en cuenta los datos recabados de manera experimental durante las limitadas pruebas del primer prototipo y los prototipos de combustión.

Partiendo de la siguiente ecuación general de fuerza de tracción en un vehículo, podemos identificar que se necesita una serie de valores característicos del vehículo (masa, área frontal, coeficiente de resistencia a la rodadura, coeficiente de arrastre aerodinámico, etc.).

$$f_t = f_I + f_g + f_{rr} \cdot \cos(\alpha) + f_{wind}$$

$$f_t = M_{car} \dot{v}_{car} + M_{car} \cdot g \cdot \sin(\alpha) + M_{car} \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot c_{rr} + \frac{1}{2} \rho_{air} C_{drag} A_{front} (v_{car} + v_{wind})^2$$

Donde:

f_t =Fuerza de tracción

f_I =Fuerza de inercia

f_g =Fuerza de a la gravedad

f_{rr} =Fuerza de resistencia a la rodadura de las llantas

f_{wind} =Fuerza de resistencia del viento

α =Ángulo de la superficie

M_{car} =Masa del vehículo

\dot{v}_{car} =Aceleración del vehículo

g =Aceleración de la gravedad

c_{rr} =Coeficiente de resistencia a la rodadura

ρ_{air} =Densidad del aire

C_{drag} =Coeficiente de arrastre aerodinámico

A_{front} =Área frontal

v_{car} =Velocidad del vehículo

v_{wind} =Velocidad del aire

Los valores mostrados a continuación se decidieron tomando en cuenta los datos mencionados en el párrafo anterior.

Masa vehículo [Kg]	225	Cdrag [1]	0.844
Masa piloto [Kg]	65	Afront [m2]	0.77
Mcar [Kg]	290	ρ_{air} [Kg/m3]	1.2
Diferencia de potencial [V]	214.5	crr [1]	0.03
Radio de llanta [m]	0.22352	vwind [m/s]	0
α [rad]	0	g [m/s2]	9.81

Dentro de la información proporcionada por la competencia año con año, se encuentra el trazado de pista de la prueba de resistencia de la temporada inmediata anterior. Con esta información, el sistema de Transmisión y Motor tuvo la labor de seccionar el circuito en rectas y curvas para así asignar tiempos de vuelta y proponer velocidades como se muestra en la figura siguiente. Cabe mencionar que no existe aceleración en curvas, por lo que se considera una velocidad constante.

Distancia por vuelta [m]	Distancia por vuelta [km]
1333.44	1.333
Recorrido [m]	Número de vueltas
22000	16

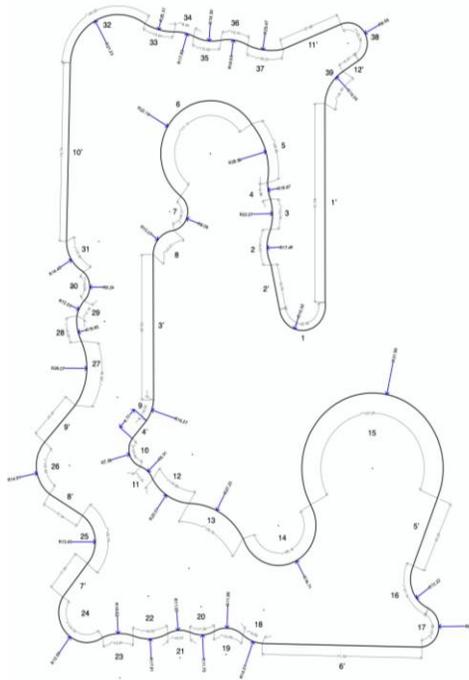


Ilustración 4, Circuito de resistencia dividido en secciones

Curvas			
No. Curva	Radio [m]	Distancia [m]	Velocidad [m/s]
1	10.3	32.59	9.05
2	17.46	15.57	11.78
3	22.27	12.79	13.30
...
38	8.59	25.29	8.26
39	16.99	16.19	11.62

Rectas	
No. Recta	Distancia [m]
1	83.13
2	18.76
3	60.9
...	...
11	27.69
12	8.43

Partiendo de los valores característicos, las velocidades propuestas en cada sección y la ecuación general se pueden ir calculando pequeños valores de fuerza de tracción en cada recta y curva de la pista con la tabla siguiente. Cada recta y curva se partió en 10 subsecciones. Al obtener el producto de estas fuerzas por las distancias “d” de cada sección de pista, se pueden ir obteniendo pequeñas magnitudes de energía en “E” por cada sección y subsección. A su vez dividimos la energía entre el tiempo y obtenemos potencia mecánica “Wm”. Igualamos esta potencia mecánica a la eléctrica “We” para luego dividir entre la diferencia de potencial “V” y así encontrar la corriente “I”.

$$E = f_r * d$$

$$W_m = \frac{f_r}{t}$$

$$W_m = W_e$$

$$I = \frac{W_e}{V}$$

Finalmente, multiplicamos la corriente “I” por los tiempos “t” de cada subsección y para así lograr llegar a la capacidad total “C” en Ah necesaria para terminar la prueba de resistencia. Una porción de los valores para los cálculos se encuentra en el anexo 10.1.

$$C = I * t$$

Al realizar los cálculos pertinentes, nos encontramos que las celdas de 20 Ah tienen la capacidad suficiente, ya que utilizaremos solamente 1.1975 Ah por

vuelta, teniendo así un total de 19.16 Ah para terminar la prueba. Asimismo, tendremos una corriente máxima de 94.19 A y un promedio de 36.18 A.

2.3 Factores por considerar para selección de compuestos de baterías

Al tener la capacidad necesaria para terminar la prueba de resistencia, se procedió a analizar los productos existentes en el mercado para así lograr una selección correcta de componentes, dadas las demandas del vehículo. De manera general, existen dos propiedades en las baterías que ayudan a simplificar la selección.

Propiedad	Descripción	Unidades
Potencia específica	Relación entre potencia de descarga nominal y peso de la batería.	W/kg
Energía específica	Relación entre el contenido energético nominal y el peso de la batería.	Wh/kg

La batería con la mayor energía y potencia específica otorgará más potencia de descarga y almacenamiento por unidad de peso, por lo que, si graficáramos estas dos propiedades para diferentes compuestos, la mejor opción sería la que se encontrará más arriba y más a la derecha en la gráfica.

A continuación, se muestra una imagen de referencia con los compuestos más populares en la fabricación de baterías.

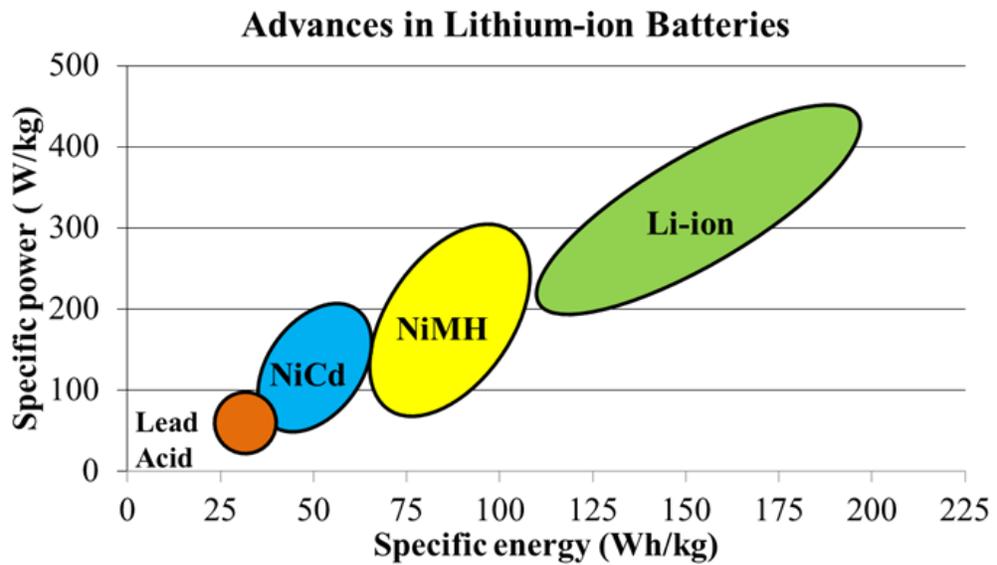


Ilustración 5, Energía vs. potencia específica, varios compuestos (CALCE, 2017)

Sin embargo, nosotros consideramos también otros parámetros de interés en la selección de las baterías. Debido a la complejidad del análisis, fue necesario hacer un proceso de selección en dos etapas para ir haciendo un filtrado desde un compuesto general de baterías hasta un producto concreto del mercado. Con la ayuda de herramientas como las matrices de decisión, pudimos definir, parametrizar y ponderar las características más importantes en cada una de las etapas, para así poder tomar una decisión final.

Etapas de selección	Características consideradas
Etapas 1: Compuesto específico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Energía Específica. Es la energía almacenada por unidad de peso. Se consideró el valor promedio del rango de valores disponibles. 2. Potencia Específica. Es la potencia que puede entregar una

	<p>celda por unidad de peso. Se consideró el valor promedio del rango de valores disponibles.</p> <p>3. Seguridad. Se consideró el nivel de las gráficas estandarizadas de los compuestos.</p> <p>4. Costo. Se consideró el valor promedio del rango de valores disponibles.</p> <p>5. Ciclos de Vida. Se consideró el valor promedio del rango de valores disponibles.</p>
<p>Etapa 2: Producto del mercado</p>	<p>1. Energía Específica. Es la energía almacenada por unidad de peso. Se consideró el valor promedio del rango de valores disponibles.</p> <p>2. Potencia Específica. Es la potencia que puede entregar una celda por unidad de peso. Se consideró el valor promedio del rango de valores disponibles.</p> <p>3. Seguridad. Se consideró el nivel de las gráficas estandarizadas de</p>

	<p>los compuestos.</p> <p>4. Costo. Se consideró el valor promedio del rango de valores disponibles.</p> <p>5. Disponibilidad. Se consideró el número de proveedores con existencia actual de las celdas.</p>
--	---

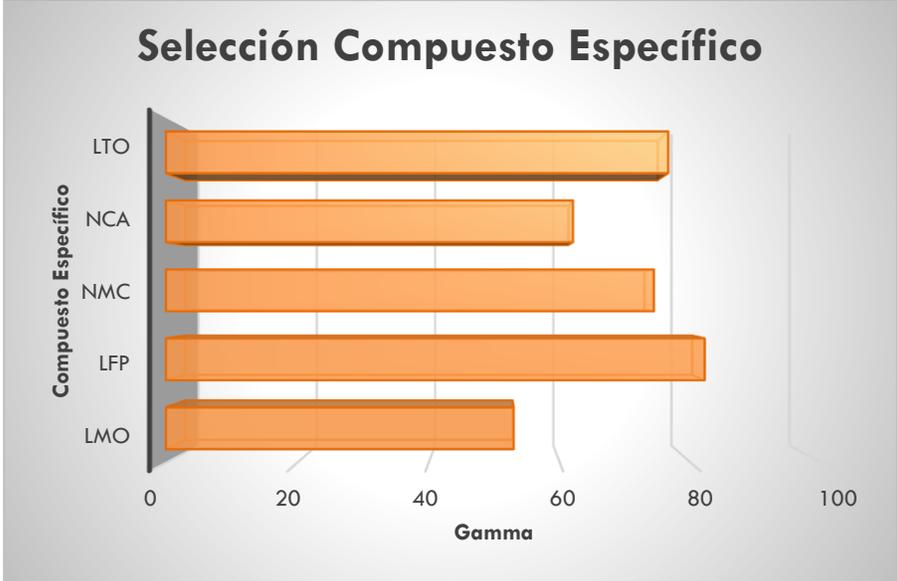


Ilustración 6, Resultado de matriz de decisión para compuesto

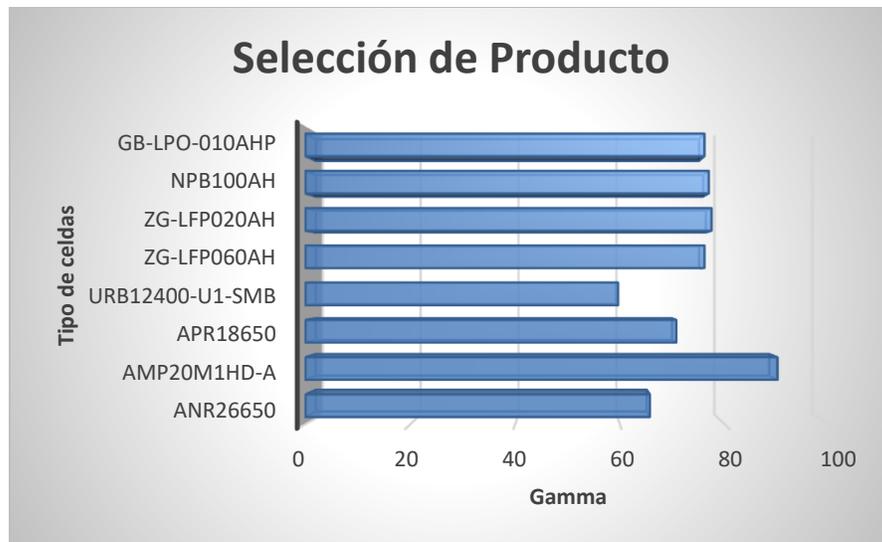


Ilustración 7, Resultado de matriz de decisión para producto

Con esto se obtiene que el mejor tipo de celda, dados nuestros criterios de evaluación, es la batería LFP (litio hierro fosfato por sus siglas en inglés) AMP20M1HD-A de la marca A123 Systems, cuyas características se muestran a continuación:

AMP20M1HD-A	
Dimensiones [mm]	7.25x160x277
Masa [g]	496
Capacidad [Ah]	19.5
Contenido energético nominal [Wh]	65
Potencia de descarga nominal [W]	1200
Potencia específica [W/kg]	131
Energía específica [Wh/kg]	247

Temperatura de operación [°C]	-30 a 55
-------------------------------	----------

2.4 Consideraciones de seguridad

Al trabajar con compuestos tóxicos y volátiles como lo son el LFP, resulta de suma importancia analizar los documentos de seguridad proporcionados por el fabricante. Algunos de los puntos a resaltar del uso de este tipo de baterías son los siguientes:

- Las celdas no deben ser sometidas a temperaturas mayores a 65 [°C] cuando se encuentren en almacenamiento. De lo contrario la vida de la celda se verá degradada.
- Las celdas no deben exceder los 85 [°C] durante su operación. Si se llega a esta condición, la vida de la celda se verá degradada y existe una alta probabilidad de que se vuelva obsoleta.
- Las celdas no deben ser cargadas o descargadas fuera de la temperatura de operación establecida en la hoja de datos proporcionada. Además, se deben seguir los límites de corriente recomendada.
- Las celdas no deben ser incineradas ni almacenadas o usadas cerca de cualquier tipo de fuego.
- Las celdas no deben ser perforadas, rotas, dentadas o aplastadas.
- El empaquetamiento de la celda no debe ser alterado.
- Las celdas no deben ser metida o expuestas a humedad o líquidos.

- Nunca usar mecanismos que sujeten las celdas del lado donde se encuentran los orificios de ventilación. Si esto ocurriera, los gases no podrían salir en caso de que la misma fallara.
- Si la celda emitiera humo o flamas, ventilar el área inmediatamente y evitar respirar los humos.
- Las celdas no deben ser objeto de polaridad invertida o cortos circuitos. El uso de fusibles individuales por celda es requerido es necesario en caso de usar arreglos en paralelo.

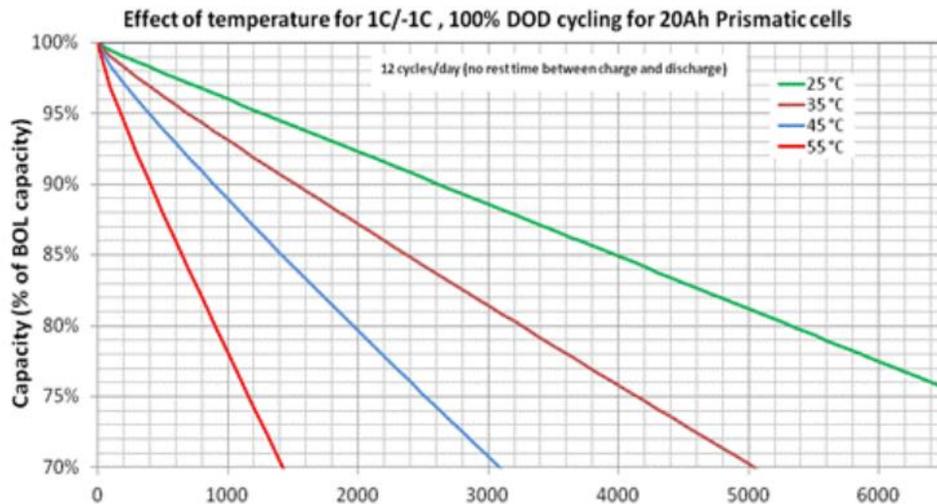


Ilustración 8, Efecto de la temperatura sobre los ciclos de vida a 1C de descarga

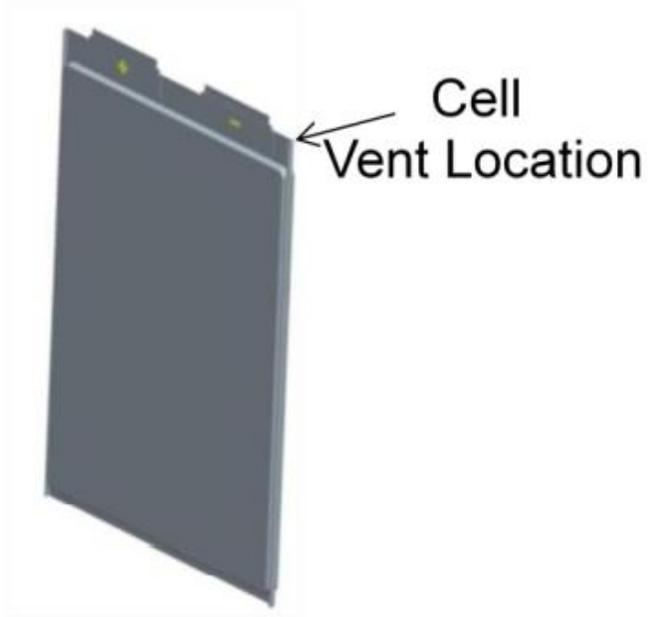


Ilustración 9, Localización de orificio de ventilación

3. Módulos de celdas

3.1 Arreglo en serie y paralelo

Como se mencionó anteriormente, las velocidades para los diferentes circuitos de la competencia fueron definidos por los integrantes a cargo del sistema de Motor y Transmisión del prototipo. Al conocer la velocidad máxima que se propone y las características particulares del motor seleccionado, el cual es un motor trifásico de imanes permanentes marca Emrax 208 de medio voltaje, se decidió trabajar con una diferencia de potencial de 190 [V] nominales en el acumulador.

Partiendo de la curva de descarga de la batería, se observa que, conforme esta se vaya descargando, la diferencia de potencial irá disminuyendo significativamente, lo que se traducirá una velocidad máxima posible menor en el motor. Por esto, es recomendable utilizar una diferencia de potencial mayor para tener un factor de seguridad durante los recorridos más largos como es la prueba de resistencia. Debido a la poca disposición de datos en pruebas dinámicas y por motivos de seguridad y económicos, se decidió trabajar con 210 V nominales en acumulador.

Sabiendo que utilizaremos las baterías AMP20M1HD-A y que estas tienen un voltaje nominal de 3.3 V, se calcula que usaremos un total de 65 celdas en serie, siendo este arreglo un 65S1P con un valor exacto de 214.5 V.

El uso de un arreglo en paralelo nos podría ayudar a multiplicar la capacidad de 20 Ah del acumulador n veces. Sin embargo, como se mencionó

anteriormente, la capacidad necesaria para terminar la prueba más larga (prueba de resistencia) es de 19.16 Ah por lo que esta configuración sería suficiente.

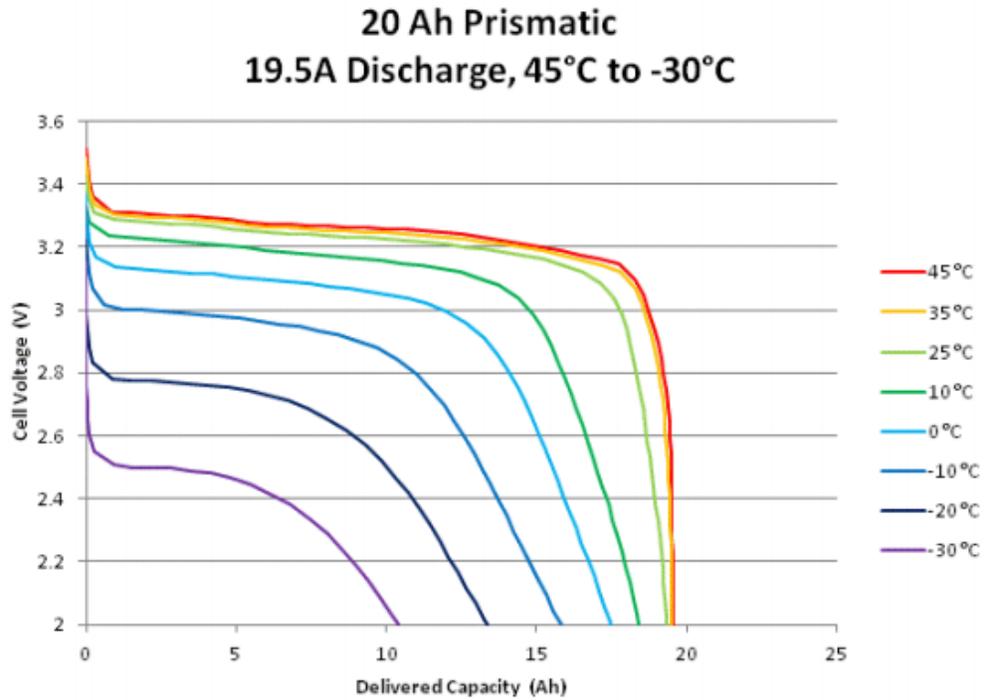


Ilustración 10, Curvas de descarga de la batería a diferentes temperaturas

3.2 Selección de geometría de celdas

Por reglamento, el acumulador se debe dividir en secciones que contengan no más de 6 MJ de energía en cada uno. Se decidió que las 65 baterías se dividirían en 5 segmentos iguales con 13 cada uno, por lo que la energía total sería de 15.058 MJ, teniendo así 3.012 MJ por cada segmento:

$$64 * 3.3[V] = 214.5[V]$$

$$214.5[V] * 19.5[Ah] = 4182.75[Wh] = 4182.75 \left[\frac{J}{s} h \right]$$

$$4182.75 \left[\frac{J}{s} h \right] = \frac{3600[s]}{1[h]} 4182.75 \left[\frac{J}{s} h \right] = 15,057,900[J] = 15.058[MJ]$$

$$\frac{15.058[MJ]}{5[\text{segmentos}]} = 3.012 \left[\frac{MJ}{\text{segmento}} \right]$$

Gracias a la geometría planteada por los integrantes del sistema de Chasis, se decidió acomodar las 5 secciones en un arreglo trapezoidal. Como se puede mostrar en la imagen siguiente, esta geometría empata de manera adecuada con las triangulaciones de los tubos, considerando que el acumulador será removido por la parte inferior del vehículo. Esta posición favorece las conexiones existentes al controlador y a los componentes del sistema de control y seguridad del vehículo. Adicionalmente, las baterías están protegidas en todas las direcciones por el chasis y no existe ninguna porción que se asome por encima de la envolvente de los tubos, como dicta también el reglamento de la competencia.

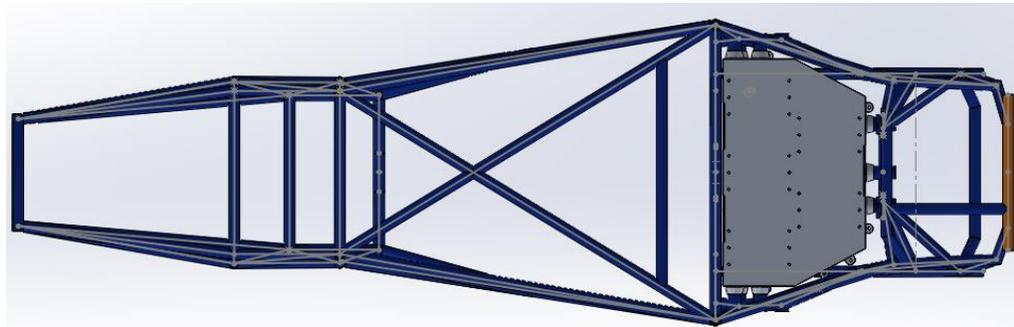


Ilustración 11, Vista inferior del chasis conteniendo al acumulador

3.3 Sujeciones

Cada sección de 15 celdas está contenida por una estructura metálica de acero. Dicha estructura denominada coloquialmente como “canasta”, además de garantizar la integridad de las baterías, está optimizada para ser considerablemente ligera y mantener una buena disipación de calor durante el funcionamiento del vehículo.

La estructura tiene dos sujeciones superiores para evitar que las baterías puedan moverse en direcciones verticales al momento de meter o sacar el acumulador para cargarlo y darle mantenimiento. Existe una propuesta de atenuadores de impacto en cada una de las esquinas hechas con algún material tipo hule. La implementación de estas se debe a que las estructuras están sujetas únicamente al piso del acumulador por medio de tuercas remachables o “rivet nuts”. El uso de los atenuadores de impacto se validará durante pruebas dinámicas. Se espera también que disminuyendo el número de barrenos en las paredes y tapas sea sencillo acreditar la parte de la inspección técnica donde se rocía el vehículo con agua.

Además, todas las paredes y piso se encuentran recubiertos internamente por un material dieléctrico, siendo esta parte la que está en directo contacto con la batería. Aunque el fabricante garantiza un sello perfecto en el producto, se han dado a conocer casos en lo que existen defectos de fabricación que provocan presencia de diferencia de potencial en diferentes partes del cuerpo de la batería. Se eligió el uso de PTFE, más comúnmente conocido como teflón, debido a sus características aislantes, flexibilidad, costo y disponibilidad.

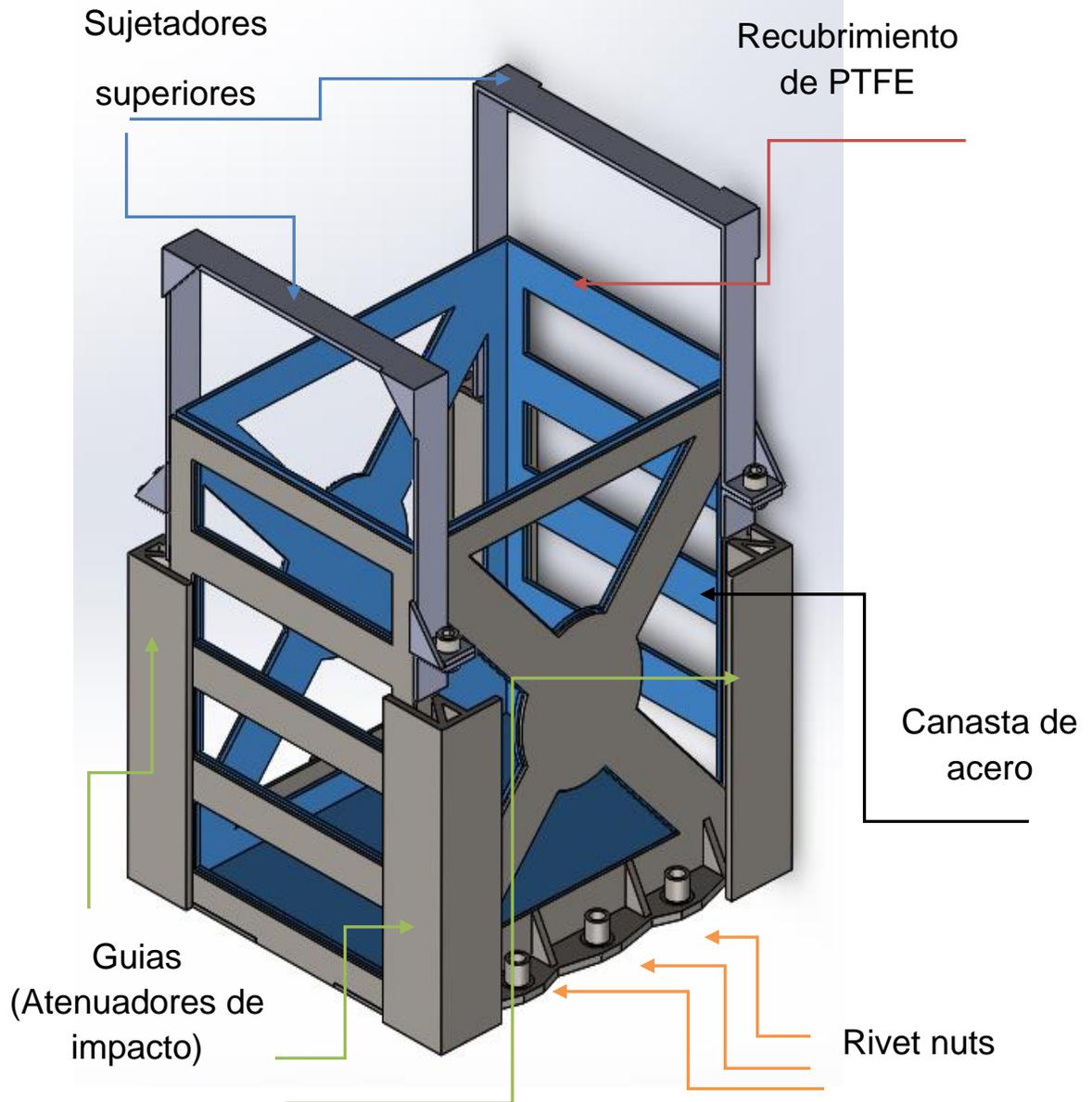


Ilustración 12, Estructura o "canasta" de las baterías

3.4 Conexiones

Cada celda tiene una pestaña positiva y una negativa, por lo que para la conexión en serie es necesario conectar la pestaña positiva de la celda n a la pestaña negativa de la celda $n+1$ y así sucesivamente. Cabe mencionar, que,

para garantizar la integridad de los componentes de las baterías y el desempeño general del vehículo, se debe evitar a toda costa que se abra la “busbar”, es decir, la línea de distribución de energía que va de las pestañas de las celdas hasta el controlador. El ensamble que se encarga de esto está compuesto de dos tapas hechas con manufactura aditiva, las cuales son apretadas entre sí por tornillos y aprisionan ambas pestañas a manera de “sándwich”. Estas tapas tienen además una espuma que ayudará a que todo esté en contacto de manera adecuada, aunque existan diferentes imperfecciones en las superficies de las pestañas. En las terminales de cada sección existe una estructura de aluminio con un pin para poder conectar las secciones entre sí.

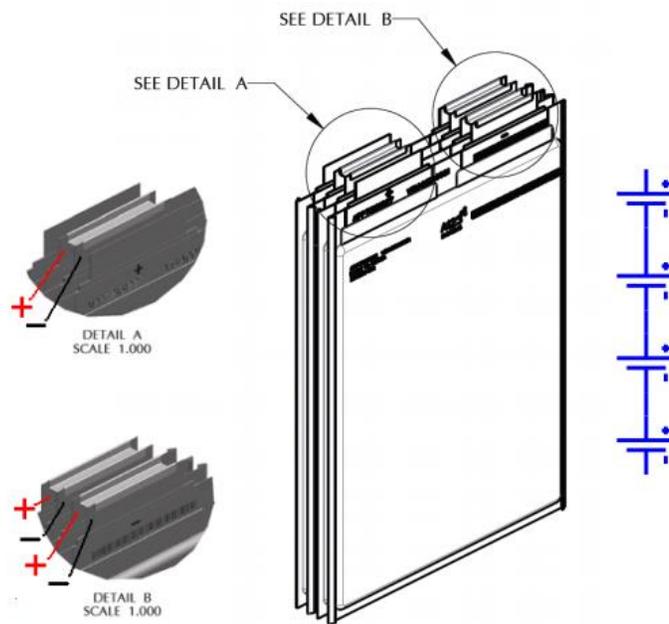


Ilustración 13, Cuatro celdas conectadas en serie (A123 Systems, 2015)



Ilustración 14, Estructura con tapas sujetando pestañas de las celdas en la parte superior.

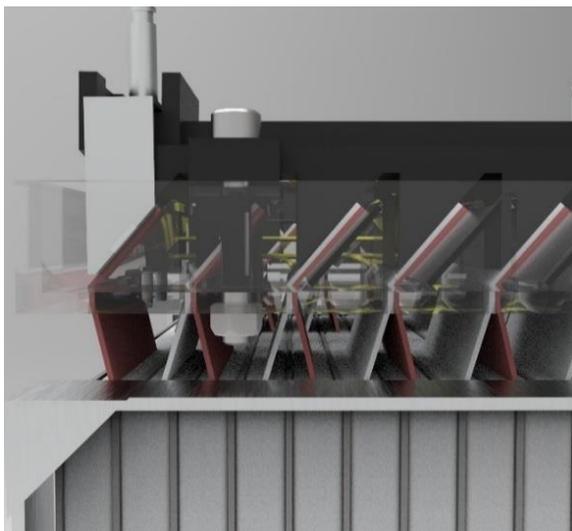


Ilustración 15, Detalle de como quedan aprisionadas las pestañas

Las conexiones existentes entre los módulos están compuestas por un cable calibre 4 AWG color naranja y conectores denominados “maintenance plugs”. Dichos conectores conectan la terminal positiva del módulo 1 con la negativa del módulo 2 y así sucesivamente. Por reglamento, cada una de estas

conexiones debe estar diseñada de tal manera que pueda conectar una y solo una terminal positiva y una y solo una terminal negativa. Así se evita producir un circuito abierto o un corto circuito. Para esto se propuso modificar los conectores de la marca Amphenol al pegar un componente geométrico hecho con manufactura aditiva a cada terminal de las secciones, como se muestra en la imagen de abajo. Junto con la geometría mencionada, se utilizan diferentes colores del material para tener una ayuda visual extra.

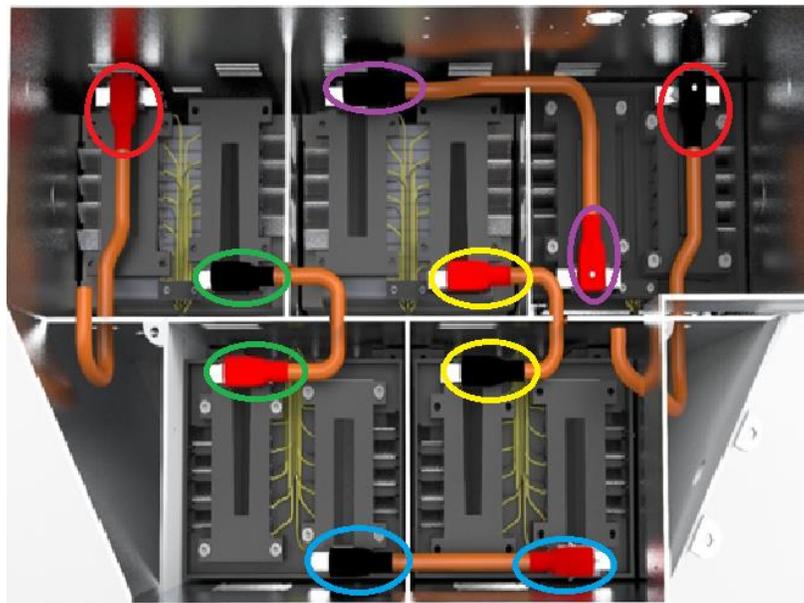


Ilustración 16, Vista superior que muestra conexión única de los segmentos

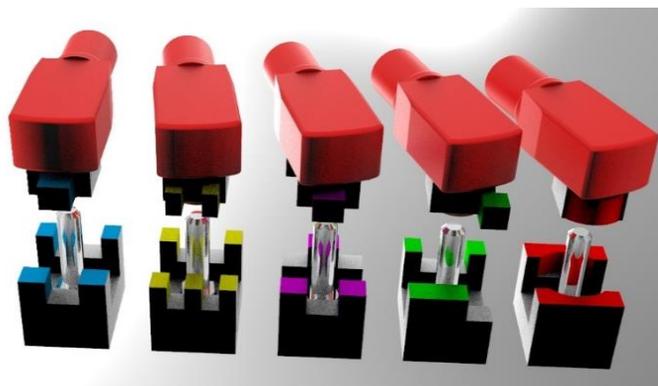


Ilustración 17, Conectores modificados con geometrías y colores diferentes

3.5 BMS

El BMS o sistema de manejo de baterías, por sus siglas en inglés, se encarga de monitorear cada una de las baterías continuamente durante su carga y descarga. Debido a las características de voltaje del acumulador, la cantidad y modelo de baterías y la disponibilidad del producto, se decidió utilizar el BMS de la marca Orion para 108 baterías. Este modelo en particular permite monitorear el voltaje individual de cada celda con un cable denominado “voltaje tap”. Cuenta además con un sensor de corriente que puede colocarse en cualquier sección de la “busbar” y sensores de temperatura o termistores que puedan ser distribuidos como mejor convenga dentro del acumulador. El Orion BMS solamente incluye 8 termistores en el empaque de fábrica, por lo que se tuvo que comprar un módulo de expansión de 20 termistores para cumplir con la regla de censar por lo menos 20% de las baterías, siendo esta una cantidad de 13 baterías.

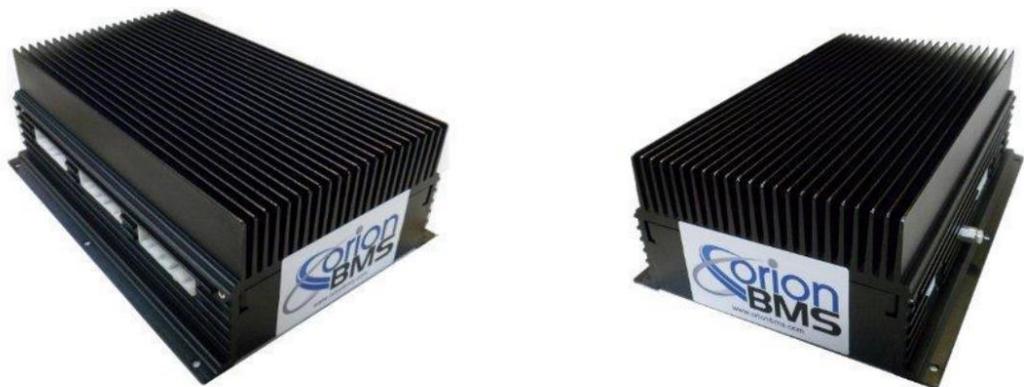
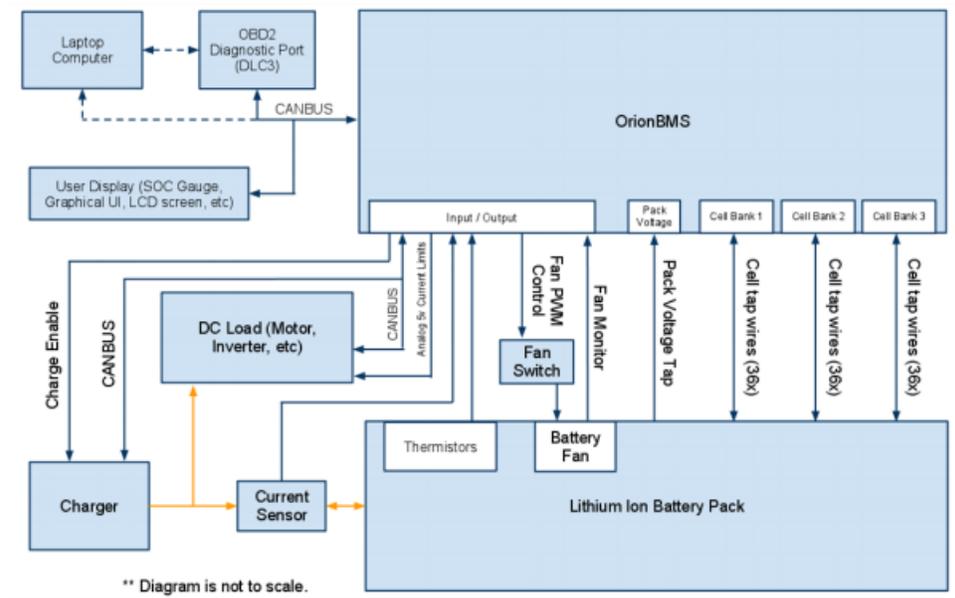


Ilustración 18, Orion BMS en dos vistas

Por la parte del control, el BMS tiene un arnés que cuenta con diferentes tipos de señales que permiten la habilitación de carga y descarga, entregan

valores de temperatura, corriente y voltaje en valores de 0 a 5 volts, permiten controlar ventiladores, por mencionar algunos. Estas señales son utilizadas por el sistema de Seguridad y Controlador para la adquisición de datos del vehículo y la implementación de los sistemas de seguridad para el sistema de tracción y del piloto. El acumulador se puede conectar a una computadora por medio de un protocolo CAN para parametrización del BMS y visualización de datos en tiempo real en interfaces dedicadas.

Existen algunas consideraciones importantes para la conexión de los “voltaje taps” a las baterías. Existen 3 conectores con 36 cables cada uno, por lo que el uso de dos conectores es suficiente para nuestro arreglo, ya que contamos solamente con 65 celdas. Cada uno de estos conectores tiene un número de identificación (1-36) asignado a cada uno de los “voltaje taps” e incluso cuenta con una etiqueta con el número impreso para visualizarlo con mayor facilidad. Adicionalmente, el conector se divide en 3 secciones de 12 “voltaje taps” cada una, la cual tiene una tierra particular que debe ir conectada a la terminal negativa de la primera celda del subgrupo de 12 y cada uno de estos sub grupos de 12 tiene un color asignado. Finalmente, hay un conector más pequeño denominado “full voltaje tap” con dos cables que deben ir conectados a cada una de las terminales del arreglo completo de las baterías, es decir, al más positivo y al más negativo. Todo esto está descrito muy claramente en el manual de cableado del fabricante y hace mucho hincapié en el hecho de que una mala conexión puede dañar significativamente el dispositivo.



Overview of system connections

Ilustración 19, Esquemático general del Orion BMS (Orion, 2014)

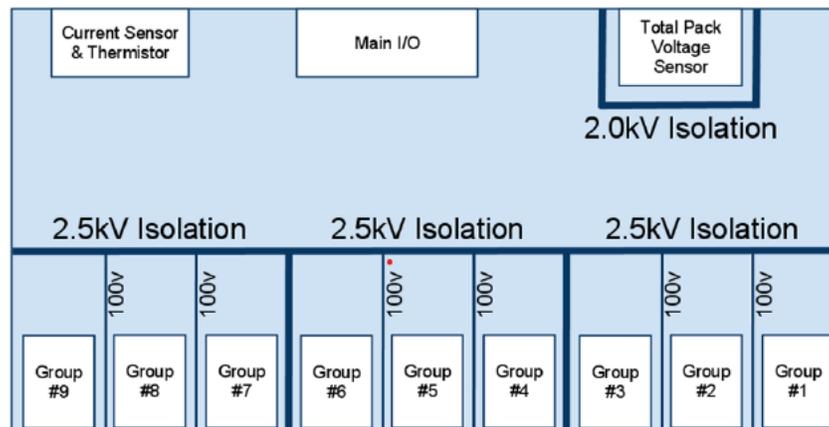


Ilustración 20, Bloques con grupos y subgrupos de "voltaje taps" en la parte inferior (Orion, 2014)

Existen varios casos comunes de falla identificados en el documento mencionado. Para empezar, si existe una desconexión en la busbar o algún "voltage tap" durante el uso del paquete de baterías, ya sea en carga o descarga, existirá una gran posibilidad de que vuele alguno de los fusibles internos. Como muestran los diagramas de abajo. En cuanto existe una desconexión, el BMS dejará de censar la diferencia de potencial existente entre

las dos baterías en cuestión, y tomará la existente en el cargador, en el caso de carga, o el del controlador en caso de descarga, el cual puede alcanzar el voltaje total máximo del acumulador.

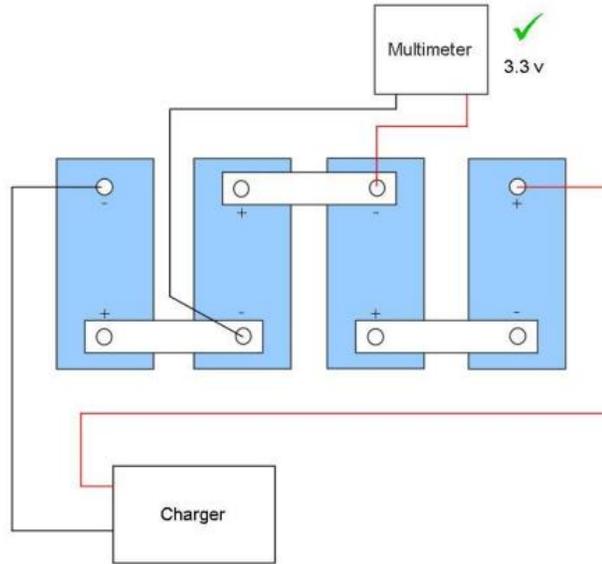


Ilustración 21, Conexión normal de "voltage taps" (Orion, 2014)

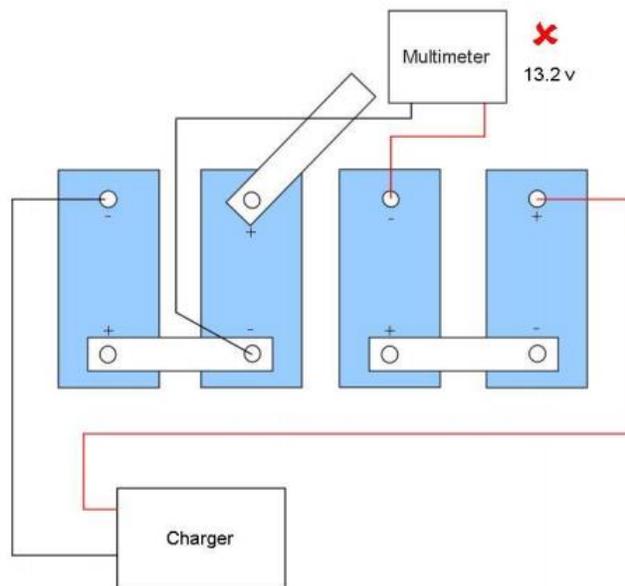


Ilustración 22, Desconexión de "voltage taps" (Orion, 2014)

Otro caso común de falla es la conexión incorrecta de los “voltage taps”. De forma general pueden existir dos eventos si el “voltage tap” en cuestión se conecta en un nivel de diferencia de potencial mayor o menor (negativo) del que le corresponde.

- Mayor. Si es que la diferencia de potencial existente entre dos cables de censado excede los 60 [V], existirá un daño interno debido a que las características de los componentes internos.
- Menor. Existiría una diferencia de potencial negativa. Debido a que internamente el BMS funciona con diodos Zener, si es que existiera una polaridad invertida, estos podrían conducir libremente y provocarían que se quemaran los fusibles internos.

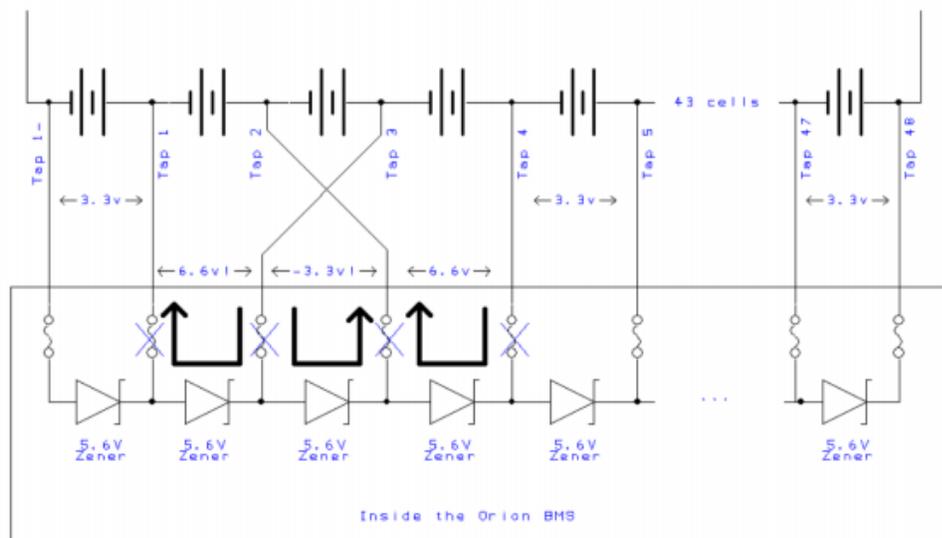


Ilustración 23, Conexión incorrecta, conducción en diodo Zener (Orion, 2014)

Debido a la sensibilidad del componente, procedimos a tener especial cuidado en el diseño de sujeción de los “voltage taps” y termistores. Como se

mencionó anteriormente, el uso de tapas que comprimen las pestañas garantiza el buen funcionamiento y seguridad del BMS en todo momento. Existe también una cavidad dentro de la tapa inferior impresa 3D para poder sujetar los termistores con facilidad. Finalmente, para tener un mejor acomodo de los cables, se incorporaron canales de distribución en uno de los extremos de la tapa inferior, como se muestra en las imágenes de abajo.

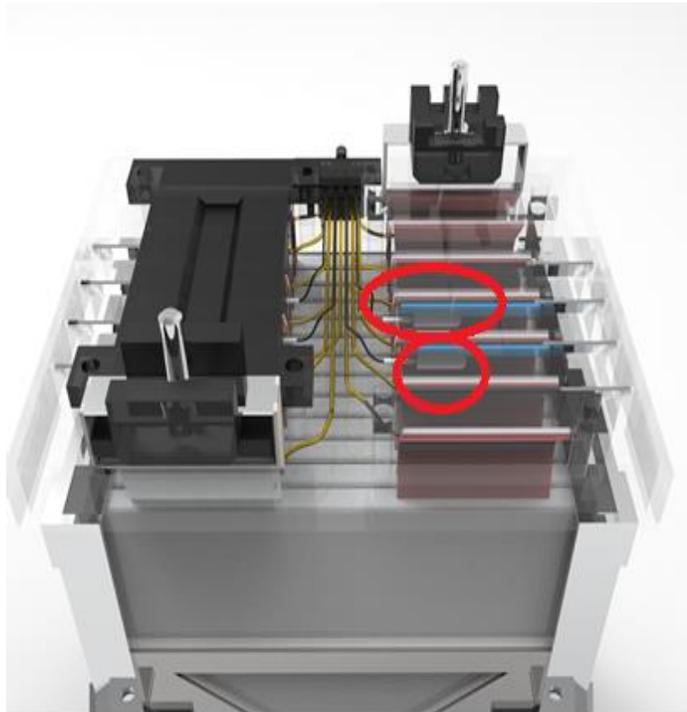


Ilustración 24, Cavidades para termistores integradas en la tapa inferior

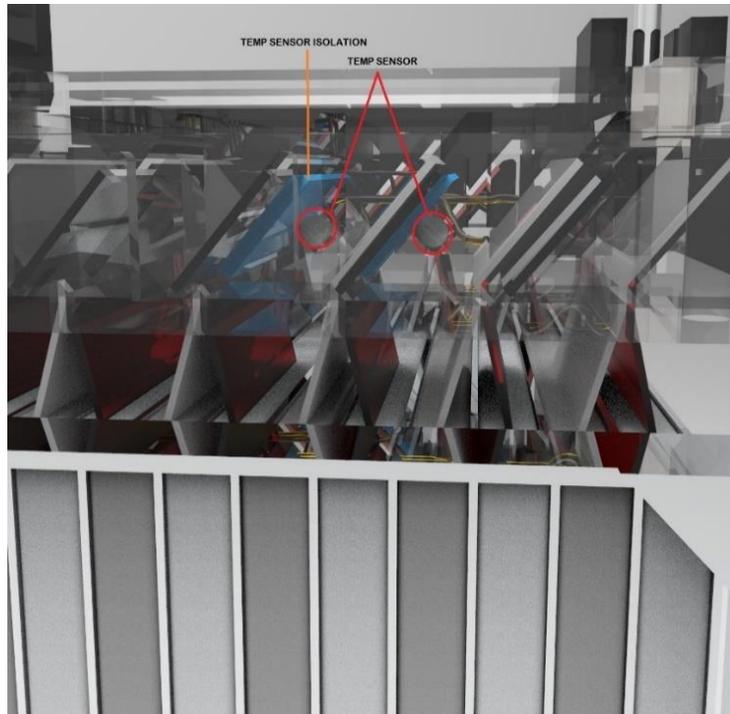


Ilustración 25, Vista lateral que muestra espacio para "voltage tap" y termistor



Ilustración 26, Pieza para mejorar distribución de cableado

4. Acumulador

4.1 Geometría

Para definir la estructura final del acumulador se realizaron varias consideraciones con el resto de los sistemas que se encuentran en la parte posterior de la cabina. Tras realizar varias propuestas de acomodo y tomando en cuenta el volumen de todos los componentes contenidos en el acumulador, se decidió usar una estructura de sección trapezoidal. Las dimensiones finales se muestran en la siguiente tabla:

Dimensión	Magnitud en mm
Largo	331.76
Ancho	538.16
Alto	440.78

Dado que tenemos conexiones de alto y bajo voltaje que interaccionan con otros sistemas, fue necesario considerar las trayectorias de arneses para el acomodo interno de los componentes. De manera general, existen dos compartimientos dentro de la estructura. En la parte inferior se encuentran las baterías, mientras que en la superior todos los dispositivos de control, tanto de alto como bajo voltaje.

Las señales de control compartidas con el sistema de seguridad y controlador salen por la parte frontal del acumulador debido a que todos los circuitos de control se encuentran debajo del asiento del piloto. Los cables de

alto voltaje salen por la parte lateral hacia el controlador, el cual se encuentra posicionado por encima de la estructura.



Ilustración 27, Estructura del acumulador

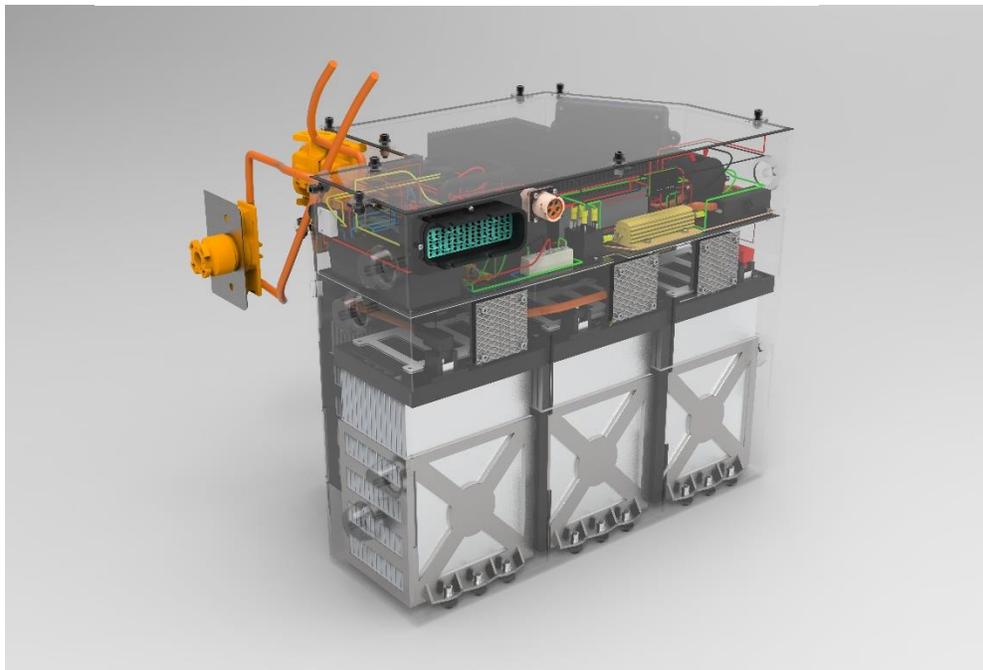


Ilustración 28, Interior del acumulador, conectores en parte frontal y lateral

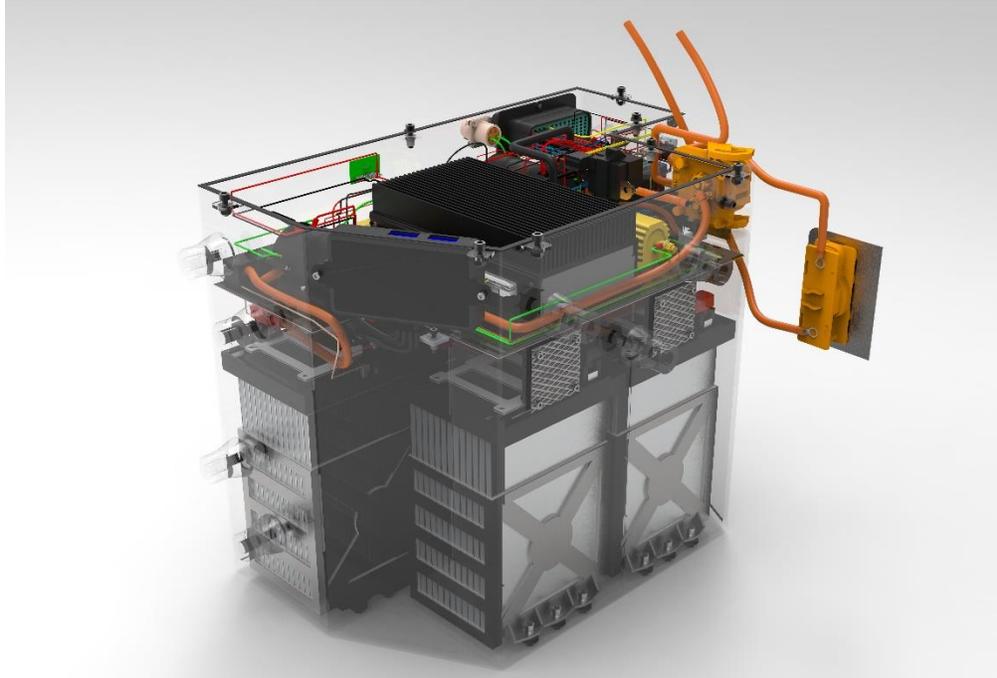


Ilustración 29, Interior del acumulador, secciones inferior y superior

4.2 Materiales y método de manufactura

Tras realizar los diseños en CAD y selección de componentes, se estimó que el peso total del acumulador sería de 72.963 [kg] aproximadamente con una aleación de aluminio como estructura. Dados los objetivos de temporada, se sabía que el optimizar la energía y reducir pesos era un camino por seguir para cumplirlos. A estas consideraciones se le sumó el coeficiente de transferencia de calor, costo y disponibilidad, por lo que se decidió usar una aleación 6061.

Las placas de aluminio fueron cortadas por chorro de agua a presión con planos obtenidos del CAD. Para unir estas piezas, se soldaron las paredes externas del acumulador. Se decidió usar este método para evitar el tener juntas innecesarias que pudieran poner en peligro la integridad de los componentes durante la prueba de lluvia. De esta forma, quedaron solamente dos cubiertas

atornillables: la tapa intermedia que divide la sección inferior de la superior del acumulador, y la tapa superior general que cierra finalmente el acumulador. A esta última se le colca un sello de agua para evitar filtraciones. Se hablará más a profundidad de este componente más adelante.

4.3 Sujeciones a chasis

Después de tener un espacio asignado en la parte posterior del vehículo, se trabajó en conjunto con el sistema de Chasis para diseñar las triangulaciones necesarias para sostener al acumulador. Como se mencionó anteriormente, un objetivo del diseño fue sacar este por la parte inferior del vehículo para facilitar los procesos de carga y mantenimiento. Partiendo de este objetivo de diseño, se propuso un tipo de estructura cónica que iría soldada a las paredes del acumulador para así tener 11 puntos de sujeción con el chasis. Debido a que la masa total del acumulador supera los 72 kg, debimos colocar más de 10 sujeciones, como menciona el reglamento de la competencia.

La estructura fue diseñada para ser ligera y fácil de manufacturar en torno convencional, por lo que se propuso la estructura cónica con un barrero único. Debido a que los tornillos que sujetan la estructura con el chasis son de acero y el acumulador es de aluminio, se tuvo que considerar un diámetro especial en barreno, ya que se usó un machuelo especial que permitiera insertar los “helicoil” y así evitar un desgaste en la cuerda del aluminio. Por la parte de chasis se diseñó una estructura conformada por un tubo y una pieza de acero torneada que contiene un tope y un barreno para la inserción de los tornillos M10. Estos últimos, también elegidos en base al reglamento de la competencia.



Ilustración 30, Sujeciones cónicas en la parte lateral del acumulador

4.4 Mantenimiento

Para trabajar con el acumulador para mantenimiento y carga es necesario el uso de herramienta y equipo de seguridad adecuado. El reglamento de la competencia hace mucho hincapié en estos procedimientos y proporciona una lista de ellos:

- Multímetro con puntas de prueba
- Desarmador aislado
- Pinzas de corte asiladas
- Guantes certificados (la certificación no debe de ser mayor a un año)
- Careta
- 2 mantas o tapetes aislantes con una área igual o mayor a 0.93 [m²] cada una.
- Herramienta aislada en general

- Lentes de seguridad con protección lateral para todas las personas que se encuentren observando cerca del acumulador

Todos los artículos mencionados en la lista deben tener un grado de aislamiento superior a la diferencia de potencial máxima existente en el acumulador. El estado físico de los mismo será inspeccionado antes y durante la competencia. Estos procedimientos se extienden también a los periodos de manufactura y pruebas hechos por el equipo en la temporada.

4.5 Aislamiento del medio

Para cuidar de los componentes internos del acumulador contra los elementos del medio se debe tener cuidado en el correcto sellado de tapas y barrenos. Por un lado, se incorpora un sello de plástico en la tapa superior para eliminar la posibilidad de entrada de gotas de agua. Debido a que el acumulador se encuentra soldado por sus partes laterales, no existen juntas descubiertas. Sin embargo, si hay barrenos para el indicador LED y entrada y salida de aire de los ventiladores.

Por otro lado, tenemos los barrenos de la parte inferior que se encargan de sujetar las secciones de baterías. Aunque se espera de poco a nulo contacto con el agua en esta sección durante prueba de lluvia de la competencia, si existe la posibilidad de salpicaduras en charcos si es que llegara a llover, por lo que se planea recubrir los tornillos y barrenos con algún tipo de resina previo a los eventos.

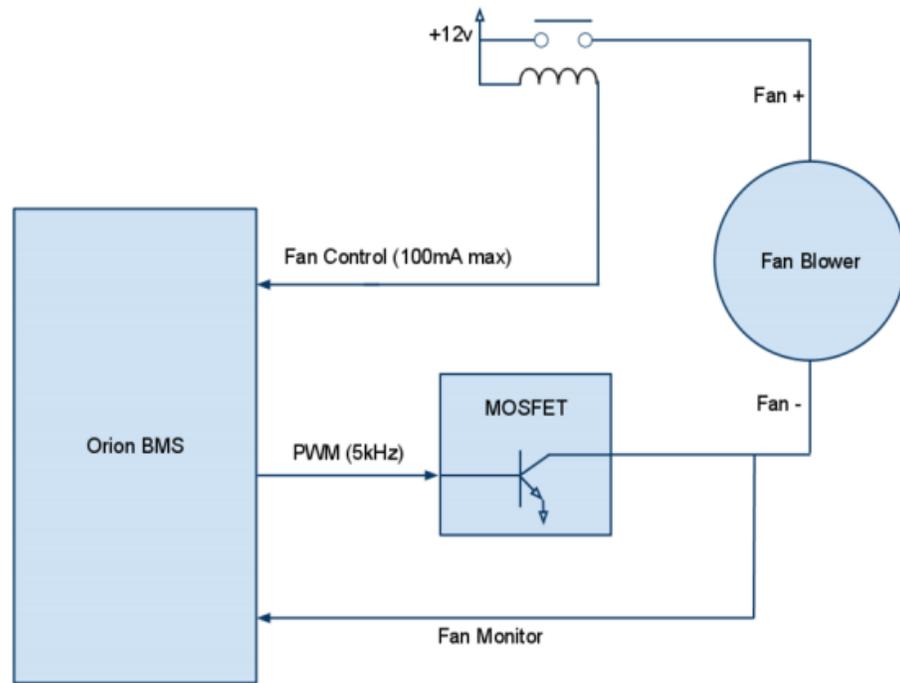
Actualmente contamos con un enfriamiento por ventiladores. Debido a que aún se está trabajando en el análisis térmico computacional y se necesitan pruebas para validar el diseño, se optó por este sistema al ser más sencillo y barato contra un sistema de enfriamiento por agua, refrigerante o algún otro tipo de líquido. Se cuentan con diferentes entradas para entrada y salida de aire. Estas se cubren con una malla hidrofóbica que permite el paso de aire, pero no del agua del entorno.

4.6 Enfriamiento

El acumulador cuenta con un sistema de enfriamiento por medio de ventiladores que hacen circular aire sobre los diferentes segmentos de las baterías. Gracias al uso del sistema de monitoreo de baterías (BMS) resulta sencillo implementar un circuito en conjunto con el sistema de seguridad y controlador con ayuda de la temperatura medida por los termistores. Además, por cuestiones energéticas, no sería la mejor estrategia tenerlos funcionando de manera permanente. Actualmente se usan 5 ventiladores de 3.72 W cada uno.

En el diagrama de abajo se puede entender el funcionamiento de una manera más clara. Al parametrizar el BMS desde la interfaz, se puede elegir la temperatura a partir de la cual debe activar la señal “Fan Control” de tipo colector abierto. A incorporar un relevador a la entrada del ventilador, como mostrado en el diagrama, este podrá ser energizado para su funcionamiento. La señal PWM acoplada con un MOSFET permitirá controlar la velocidad de los ventiladores por medio del ciclo de trabajo. La frecuencia puede ser modificada desde la interfaz del BMS. Finalmente, la señal de “Fan Monitor” permite medir

diferencial de potencial de 0 a 12 [V] para poder detectar alguna falla en el funcionamiento del sistema, si es que llegara a ocurrir. Este circuito es desarrollado en conjunto con el sistema de Controlador y Seguridad.



General fan circuit diagram.

Ilustración 31, Circuito de funcionamiento de ventiladores (Orion, 2014)

5. Circuitos de alto voltaje

5.1 Circuitos de precarga y descarga

Los circuitos de precarga y descarga están implementados en conjunto con el sistema de Seguridad y Controlador. El diseño de estos se basa casi completamente en los requerimientos del reglamento de la competencia, aunque resulta necesario también considerar diferentes características de los componentes que tenemos para poder seleccionar correctamente los componentes que formarán parte de ambos. Los requisitos del reglamento para la precarga son:

- Al encender el circuito de alto voltaje del auto, el circuito de precarga debe ser capaz de cargar el 90% de la diferencia de potencial existente en el acumulador al controlador antes de cerrar el segundo contactor.
- El tiempo que debe durar la precarga debe ser un periodo igual al doble de tiempo que debería llegar al 90% de carga.

Para el circuito de descarga:

- Diseñado de tal forma, que, en caso de cualquier caso de falla, este permanezca cerrado, incluso si el High Voltage Disconnect (HVD) es activado.

Este circuito es desarrollado por el sistema de Seguridad y Controlador. El detalle se encuentra en el anexo 10.3.

5.2 Fusible general

Dados los datos recabados de las curvas de corriente de las pruebas anteriores y el análisis hecho para calcular la capacidad del acumulador, sabemos que se espera una corriente máxima de 94.19 A y una nominal de 36.18 A. Debemos recordar también que el objetivo del fusible general es proteger al sistema de tracción en caso de corto o sobrecarga, por lo que la corriente para el que esté calculado debe ser menor al del resto de los componentes. Considerando esta información, junto con el costo, tamaño y disponibilidad se escogió un fusible de la marca Littlefuse tipo “Fast acting” calculado para 80 [A]. La curva particular del fusible se encuentra en el anexo 10.4.

Al encontrarnos con dificultades para adquirir una estructura de sujeción y asilamiento para este, procedimos a diseñar una por nuestra cuenta. Debido a la complejidad de la geometría, decidimos utilizar manufactura aditiva para fabricarlo. Por su bajo costo y disponibilidad se decidió usar PLA como material.

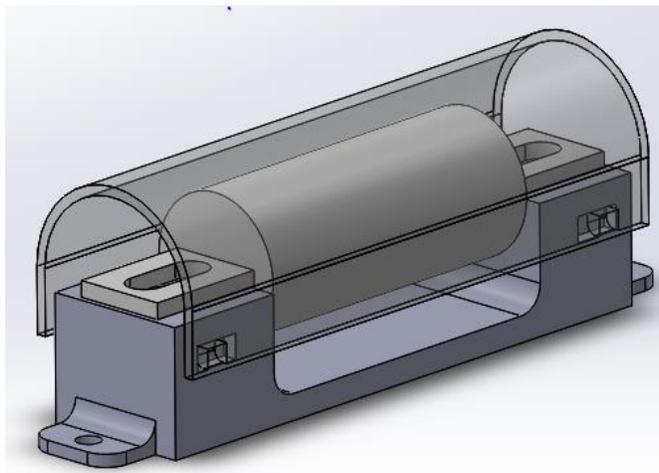


Ilustración 32, Fusible general dentro de estructura diseñada

5.3 Conectores y dispositivos de seguridad

Existen 4 conectores principales usados en el acumulador. Uno de alto voltaje que va hacia el controlador y dos de bajo voltaje que se comparten con el sistema de seguridad y controlador. El primero solamente transporta los polos negativos y positivo del controlador, mientras que los demás incorporan todas las señales de seguridad, control y telemetría, las cuales se abordarán en otra sección a mayor profundidad.

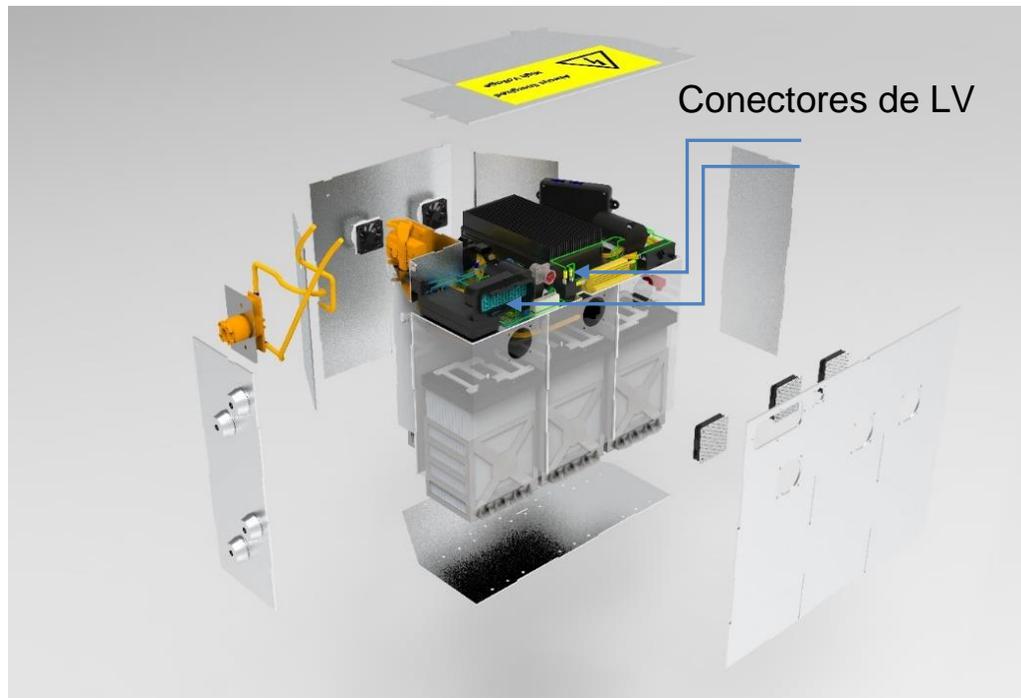


Ilustración 33, Explosivo de acumulador, conectores de LV en verde y gris



Ilustración 34, Vista superior de sección de control, conector de HV en naranja

Cada uno de estos conectores cuenta con un “interlock”, el cual es una señal monitoreada permanentemente por el sistema de seguridad y controlador. Esta señal existe ya que hay la posibilidad de que algún par de conectores se desacople, por vibraciones, descuido humano, etc. Si llegara a ocurrir esto, la señal de “interlock”, que cuenta con una entrada y una salida, se interrumpiría y esta, al ser manejada por el Sistema de seguridad y Controlador, haría que el auto entrara en un modo de falla y abriría los relevadores que existen entre el acumulador y el controlador, aislando así el circuito de alto voltaje.

El conector de alto voltaje tiene esta característica desde proveedor y solamente es necesario la conexión de dos cables (entrada y salida) en un par de pines en específico. Para los de bajo voltaje, debido a que no cuentan con esta característica desde el fabricante, se hicieron modificaciones por la parte del conector hembra que va atornillado al acumulador. Dicha modificación

consiste en puentear dos pines por la parte interna de la estructura, teniendo así el mismo funcionamiento muy similar al de alto voltaje.

5.4 HVD

El HVD, o High Voltage Disconnect, por sus siglas en inglés, es un componente mecánico incorporado en el circuito de alto voltaje (entre acumulador y controlador) que permite abrir el circuito en caso de una emergencia.

Los dispositivos de seguridad que cierran el circuito entre el acumulador y el controlador son contactores, los cuales son componentes electromecánicos que tienden a atorarse con regularidad debido a los resortes internos que tienen, dejando así el circuito permanentemente abierto o cerrado en alguna sección sin importar la señal de control que se le esté aplicando.

Las características del HVD dadas por el reglamento son:

- Estar a 350 [mm] del suelo, como mínimo.
- Debe ser visible desde la parte posterior del vehículo.
- Operable en 10 segundos o menos por una persona no entrenada
- Operable sin remover ninguna sección de carrocería o usando herramientas
- Claramente marcado con una etiqueta

Dadas estas características, usamos un conector rotatorio de la marca Aptiv que puede ser accionado simplemente jalando el cilindro para poder así abrir el circuito de manera segura.



Ilustración 35, HVD de tipo rotatorio

6. Instrumentación y seguridad

6.1 Señales del BMS

El sistema de controlador y seguridad maneja todas las señales provenientes del acumulador para poder habilitar el sistema de alto voltaje si es que todo se encuentra trabajando según los parámetros establecidos. Por el contrario, si existiera algún valor fuera de lo normal, desconexión, o cualquier otro caso de falla predefinido, este deshabilitará por completo el circuito de alto voltaje, pero siempre dejando cerrado el circuito de descarga del controlador, como se mencionó anteriormente.

Recordemos también que el BMS contiene un arnés dedicado únicamente a las señales recabadas de los sensores de diferencia de potencial, corriente y temperatura, las cuales se entregan al sistema mencionado por medio de los conectores frontales del acumulador. Dichas señales se muestran en la tabla siguiente.

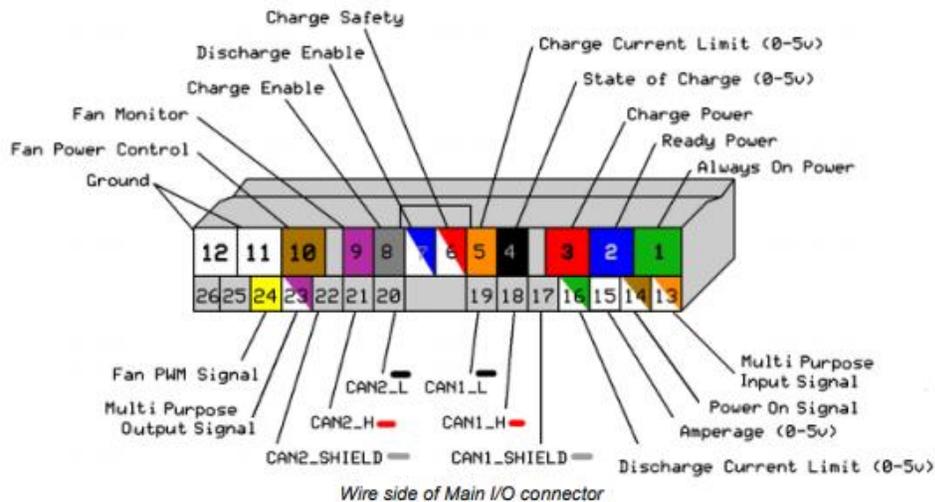


Ilustración 36, Conector del BMS conteniendo diferentes señales

Señal	Descripción
Charge Enable Signal	Señal a colector abierto usada para la carga intermitente. Usada generalmente para aplicaciones de freno regenerativo o carga a través de energía solar.
Charge Safety Signal	Señal a colector abierto usada como interruptor de seguridad para un cargador. Esta señal debe estar conectada directamente al cargador o a un relevador que habilite la conexión del cargador a la toma de corriente. De esta forma, si la señal no está activada, el cargador no podrá funcionar.
Discharge Enable Signal	Señal a colector abierto usada para habilitar la descarga del acumulador. De forma general, esta debe ser usada para controlar la conexión a un motor o controlador.
Fan Power Signal	Señal usada para activar el ventilador. Se trata de un simple interruptor que se activará según los parámetros de temperatura suministrados al BMS.
Fan PWM Signal	Señal para controlar un interruptor

	externo (MOSFET) para variar la velocidad de giro del ventilador. Esta trabaja ente el 10% y 90% del ciclo de trabajo.
Fan Monitor Signal	Monitorea la diferencia de potencial existente en el ventilador. En caso de no corresponder con las instrucciones del BMS, se activará una señal de error.
Charge Current Limit	Señal de 0 a 5 [V] que representa la corriente máxima de carga que puede aceptar el paquete de baterías en un momento dado. Esta señal puede utilizarse para limitar la corriente.
Discharge Current Limit	Señal de 0 a 5 [V] que representa la corriente máxima de descarga que puede otorgar el paquete de baterías en un momento dado. Esta señal puede utilizarse para limitar la corriente.
State of Charge	Señal correspondiente al estado de carga de las baterías, siendo 0 [V] un 0% y 5 [V] un 100 %.
Amperage Output	Corresponde a la corriente de carga o descarga que se puede tener en un

	<p>momento dado. La magnitud de diferencia de potencial en [V] estará dado por las fórmulas mostradas debajo del cuadro. 2.5 [V] corresponde a 0 [A]. Una magnitud superior a esta diferencia de potencial indicará descarga y una menor carga.</p>
Multi Purpose Input	<p>Entrada de 12 [V]. La función puede ser asignada desde la interfaz de configuración. Su función más común es la de limpiar los mensajes de error presentes en el BMS:</p>
Power Indicator	<p>Señal de salida con 1 [kΩ] de resistencia interna. Se puede usar para conectar un LED y así saber cuándo el BMS esté “despierto” o listo para usarse.</p>
Multi Purpose Output	<p>Salida a colector abierto. Puede ser asignada desde la interfaz de configuración del BMS. Normalmente es utilizada para señalar cuando exista algún mensaje de error presente en el BMS.</p>

La diferencia de potencial de la señal “Amperage Output” estará dada por la siguiente ecuación:

$$A_{Range} = ((S_{Size} * 0.25) + S_{Size}) * 2$$

$$A = \left(\frac{V}{5} * A_{Range} \right) - \left(\frac{A_{Range}}{2} \right)$$

Donde

- A_{Range} : Rango de magnitud de corriente en [A]
- S_{Size} : Tamaño del sensor (corriente máxima). En nuestro caso 200 [A].
- V : Diferencia de potencial a la salida de la señal en [V].



Ilustración 37, Sensor de corriente

En caso de que exista algún error o DTC en el BMS, las tres señales de habilitación (carga, carga intermitente y descarga) permanecerán inactivas. Los errores más comunes son de estado de carga bajo en el caso de carga y de temperatura máxima alcanzada en el caso de carga. Para esto normalmente utilizamos la entrada multipropósito para limpiar los DTC's y evitar así tener que limpiarlos directamente desde la computadora, la cual es conectada vía CAN. Dentro de la interfaz del BMS se pueden parametrizar los diferentes casos de error que se pueden tener en función de las características de las baterías proporcionadas por el fabricante.

Las señales a colector abierto cuentan con la capacidad de soportar una corriente máxima de 100 mA, por lo que están pensadas para utilizarse con un circuito amplificador que permita cerrar relevadores o contactores, tal y como hace el sistema de Seguridad y Controlador.

Algunas entradas del conector principal son usadas para alimentar el BMS o como comunicación y no son propiamente señales de seguridad. Estas se describen también a continuación:

Entrada	Descripción
CAN1_H, CAN1_L	Puertos de comunicación de protocolo CAN con líneas de comunicación de alto y bajo. Los puertos 1 contienen un resistor de 120 [Ω].
CAN2_H, CAN2_L	Puertos de comunicación de protocolo CAN con líneas de comunicación de alto y bajo.

	Los puertos 2 no contienen resistor de 120 [Ω]
Always On Power	Fuente de alimentación del BMS. Debe ser de 12 [V] y siempre debe estar energizada, de lo contrario no se podrá utilizar el dispositivo.
Ready Power	Esta fuente de alimentación de 12 [V] debe energizar al BMS siempre que esté vaya a ser utilizado ya que “despierta” al dispositivo de un estado “dormido”. Normalmente utilizado con interruptor de encendido del auto.
Charge Power	Este puerto debe ser energizado cuando se desee cargar el acumulador por un periodo definido de tiempo. Generalmente se usa un convertidor AC-DC de la toma de corriente normal, ya que el cargador seguramente estará conectado aquí y los circuitos deben tener la misma tierra de referencia. Si esta señal está energizada al mismo tiempo que la de “Ready Power” el BMS inhabilitará la señal de “Discharge Enable”

Power Ground (2X)	Tierra para cualquiera de las 3 señales "Power". Se proporcionan dos puertos para conveniencia del usuario, aunque solo es necesario usar uno.
-------------------	--

Los puertos de CAN son utilizados para conectarse a la computadora y al cargador. En el primer caso, como se ha mencionado anteriormente, para configuración del sistema y parametrización de errores. Para el segundo caso, se buscó comprar un cargador que contara con CAN para así poder comunicarse con el BMS constantemente y evitar tener más circuitos de seguridad. Al existir una conexión constante entre estos dos, solamente es necesario ocupar la señal de habilitación de carga para abrir los relevadores que alimentan de corriente AC al cargador de modelo FC2500, ya que, en caso de que exista algún caso de error en el BMS, el cargador no suministrará corriente de todas formas.



Ilustración 38, Cargador de baterías

Como se puede apreciar, el BMS nos permitirá, junto con el sistema de Controlador y Seguridad, obtener datos para poder trabajar en diseños futuros y al mismo tiempo salvaguardar al piloto y a las personas que trabajen en el prototipo.

7. Planes a futuro

A nivel general del prototipo, todavía son necesarias muchas pruebas que hacer al diseño actual para poder validar y mejorar nuestros diseños. La más importante es la del dinamómetro para poder obtener correctamente las curvas de corriente del motor y así poder diseñar el siguiente acumulador con datos reales y no sólo con aproximaciones.

Dentro del sistema es importante ver el comportamiento de descarga y temperatura durante las diferentes pruebas dinámicas de la competencia. Así sabremos si la selección de celdas y componentes fue la adecuada y podremos definir en qué dirección necesitamos robustecer el acumulador. Por otro lado, determinaremos si es necesario desarrollar un sistema de enfriamiento que vaya más allá de los ventiladores.

Más adelante, cuando validemos que este nivel de acumulador ya funciona de forma correcta, podremos pensar en arreglos en paralelo para mejorar la autonomía o en aumentar el voltaje si es que quisiéramos integrar motores en llanta en lugar de tener solamente uno. El uso de materiales compuestos para estructuras en lugar de aleaciones metálicas reduciría significativamente el peso de uno de los componentes más pesados del auto. Asimismo, cada vez hay nuevos compuestos de baterías en el mercado, con densidad energéticas cada vez mayores. Resultará también de suma importancia seguir la evolución de las siguientes generaciones para poder dar pasos hacia adelante en cuanto a la ingeniería del prototipo de la escudería.

8. Conclusiones

El diseño del acumulador de un tipo de vehículo como este debe ser trabajado cuidadosamente considerando todos los parámetros de seguridad necesarios. En primera instancia, el reglamento de la competencia puede ser una gran guía para llegar a un estándar adecuado. Sin embargo, no deben dejarse de lado las sugerencias y lineamientos establecidos por los fabricantes de componentes. Entre mejor comprendamos y consideremos esto en el desarrollo del prototipo, mayor será la seguridad que podremos brindarles al piloto y a los miembros del equipo.

Por otro lado, debemos cuidar la compatibilidad y características de los componentes. La mayoría de los elementos comprados son costosos y muy sensibles, por lo que debe tomarse especial cuidado a la selección de estos. No se debe dejar de lado el balance calidad-precio, peso, disponibilidad, etc., ya que esto se traducirá directamente en tener un mejor o peor desempeño en las pruebas dinámicas. Herramientas como la matriz de decisiones puede proveer una gran ayuda en este rubro. No se trata de tener lo mas lujoso o potente, sino apegarse a los objetivos planteados y tomar decisiones en base a las prioridades planteadas de momento a momento de la temporada.

Las baterías del vehículo suministran la energía para todo el tren de potencia. Es muy importante comprender las interacciones existentes con el motor, controlador, chasis, llantas, etc., para poder tener una buena comunicación y por ende un buen diseño conjunto. Al momento de tomar

decisiones se debe considerar primero el ámbito grupal de las divisiones y después las prioridades de cada sistema.

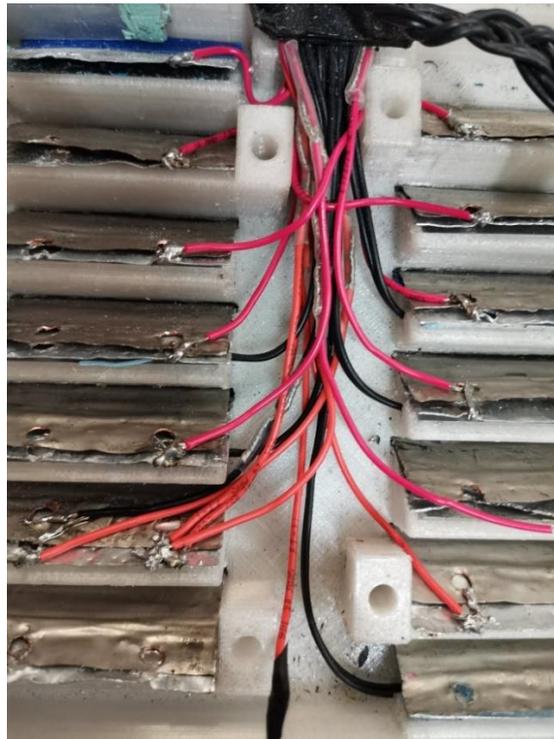
Finalmente, debemos recordar que estos son prototipos que participan en competencias anuales y que deben ir evolucionando continuamente. Para esto es sumamente recomendable basarse en diseños anteriores funcionales y hacer mejoras pequeñas. Así se podrá asegurar un buen desempeño en los elementos retomados. Debe evitarse desechar por completo los desarrollos anteriores y empezar desde cero.

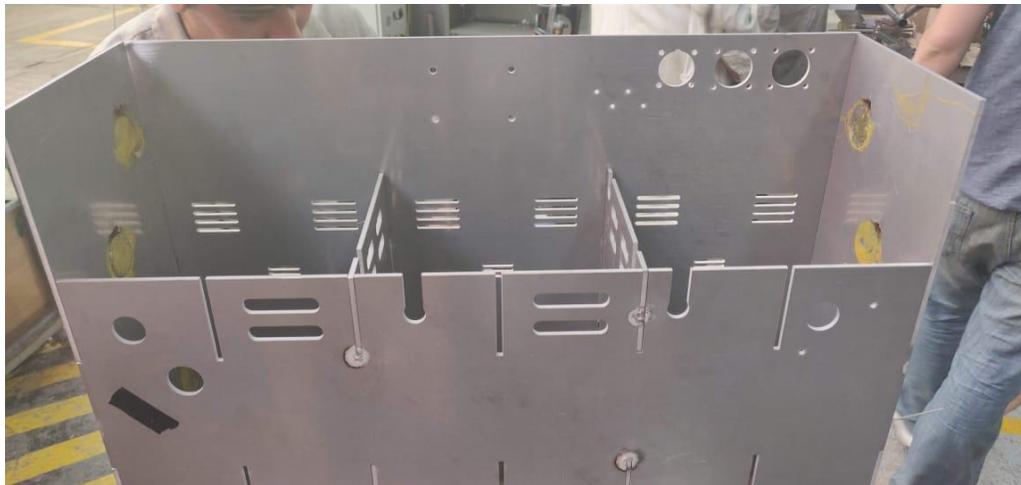
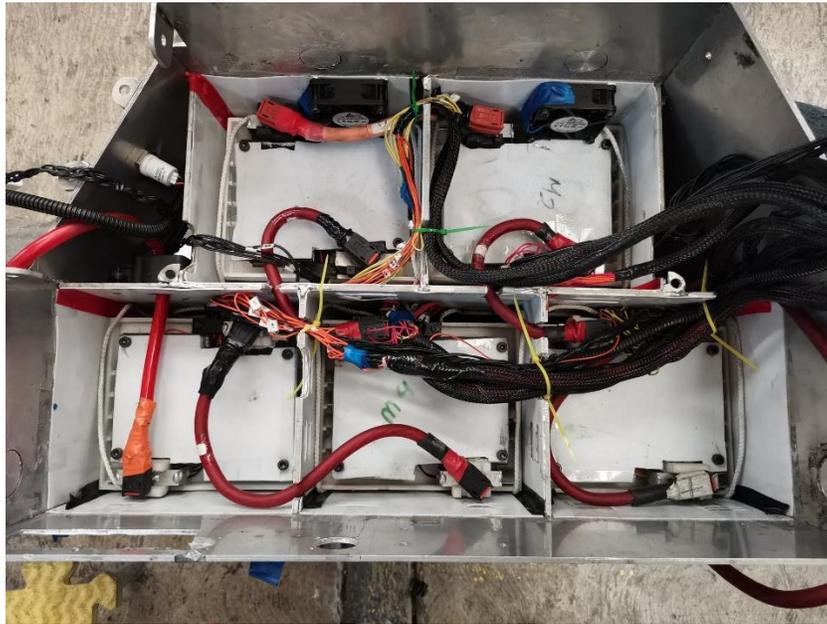
9. Bibliografía

- A123 Systems. (7 de Febrero de 2014). 20Ah Prismatic Pouch Cell. Design Guide.
- Beckman, B. (1998). The Physics of Racing Series. Stuttgart West.
- CALCE, University of Maryland. (2017). Center for Advanced Life Cycle Engineering. Obtenido de CALCE Battery Research Group: <https://web.calce.umd.edu/batteries/overview.html>
- Delta. (s.f.). AFB. 60x60x20 mm Series.
- Hirose Electric. (1 de Enero de 2017). Service Plug for 200A Applications. EM30MSD Series.
- LEM. (s.f.). Automotive Current Transducer. DHAB S/24.
- Littelfuse, Inc. (2019). POWR-GARD® Fuse. CLASS T – JLLN / JLLS SERIES.
- Orion. (s.f.). Orion BMS. Wiring & Installation Manual. Carol Stream, Illinois, USA.
- SAE International. (2 de Enero de 2020). Formula SAE. Obtenido de Series resources, Rules 2020: <https://www.fsaonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- Smith, C. (1978). Tune to Win. Fallbrook: Aero Publishers.

10. Anexos

10.1 Fotos de manufactura del acumulador



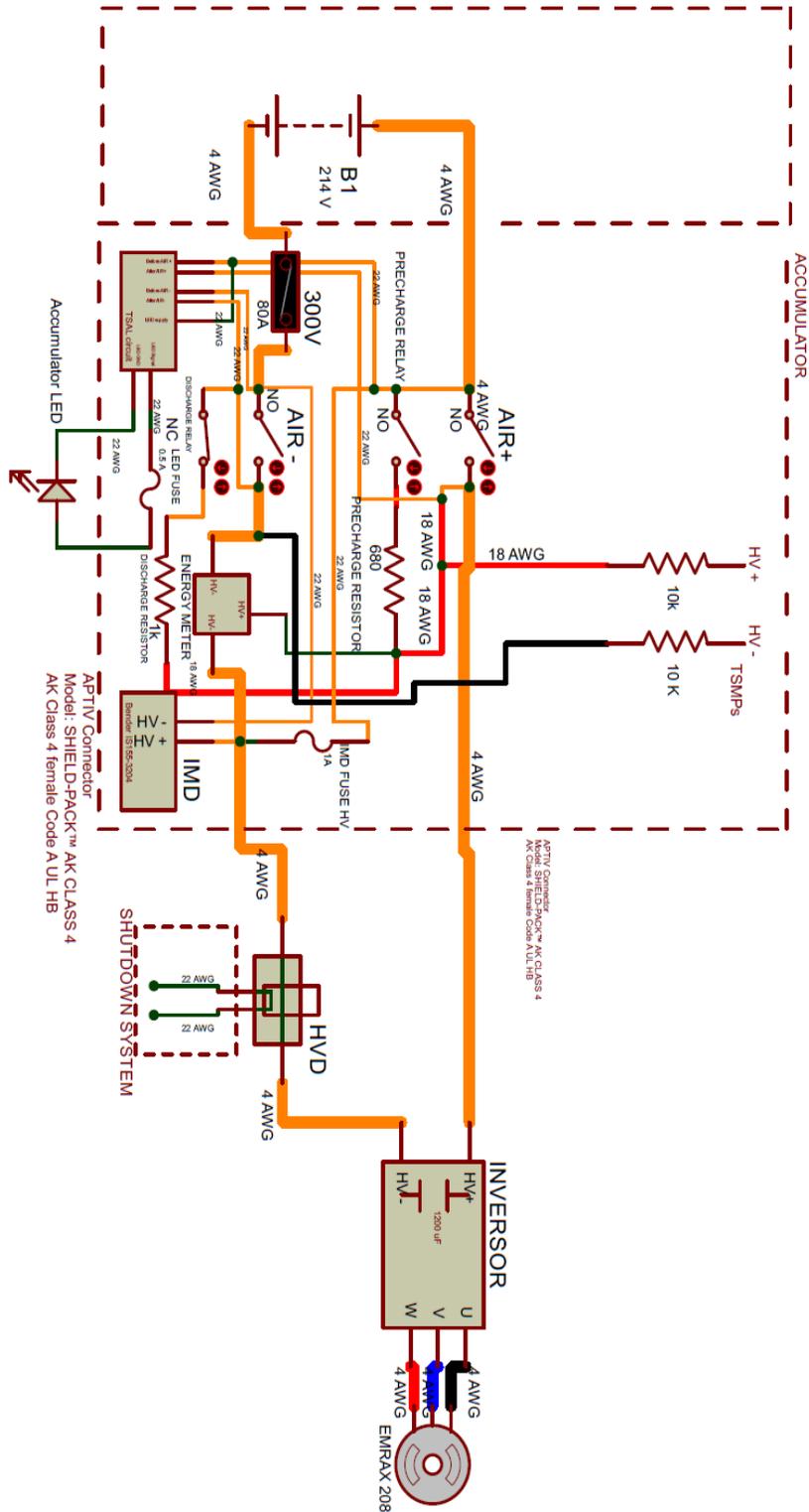




10.2 Cálculo de capacidad para una recta y una curva

Section	Length L [m]	Track Data				Velocidad				Tiempo	
		dx [m]	x [m]	R [m]	V [m/s]	V [km/h]	Δv [m/s]	RPM	t [s]	tacc [s]	
Recta 1	83.13	0	0	0	11.62	41.83	0.00	1886.31	0.00	0.00	
		8.313	8.313	0	13.62	49.04	2.00	2211.50	0.61	0.61	
		8.313	16.626	0	15.37	55.32	1.74	2494.66	0.54	1.15	
		8.313	24.939	0	16.93	60.95	1.57	2748.80	0.49	1.64	
		8.313	33.252	0	18.36	66.11	1.43	2981.36	0.45	2.09	
		8.313	41.565	0	18.29	65.86	-0.07	2969.85	0.45	2.55	
		8.313	49.878	0	16.85	60.68	-1.44	2736.32	0.49	3.04	
		8.313	58.191	0	15.28	55.01	-1.57	2480.90	0.54	3.59	
		8.313	66.504	0	13.53	48.70	-1.76	2195.97	0.61	4.20	
		8.313	74.817	0	11.51	41.42	-2.02	1868.07	0.72	4.92	
Curva 1	32.59	8.313	83.13	0	9.05	32.62	-2.45	1470.84	0.92	5.84	
		3.259	86.389	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	6.20	
		3.259	89.648	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	6.56	
		3.259	92.907	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	6.92	
		3.259	96.166	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	7.28	
		3.259	99.425	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	7.64	
		3.259	102.684	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	8.00	
		3.259	105.943	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	8.36	
		3.259	109.202	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	8.72	
		3.259	112.461	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	9.08	
			3.259	115.72	10.3	9.05	32.57	0.00	1468.70	0.36	9.44

10.3 Esquemático de circuito de precarga y descarga



10.4 Curva del fusible general

