

# Baterías de los vehículos eléctricos Tesla

para estudiantes



Funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



## STEP AHEAD II

---

The support of Professional development of VET teachers and  
trainers in following of New trends in Automotive Industry  
Automotive Innovation & Teacher training Academy  
2018-1-SK01-KA202-046334

## Baterías de los vehículos eléctricos Tesla

### Objetivo de la Unidad Didáctica:

Adquirir conocimientos sobre la constitución y funciones de las celdas de las baterías de los vehículos eléctricos

### ANEXO 3

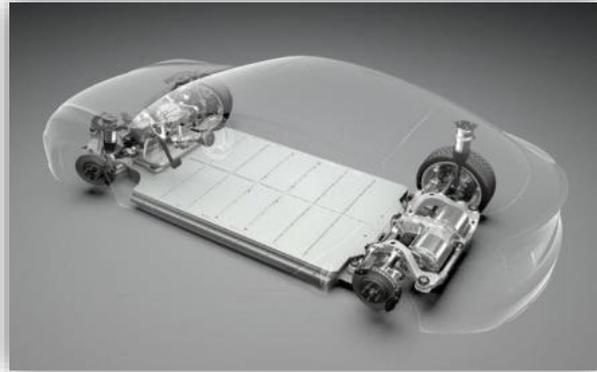


*Esta imagen está disponible bajo la licencia [Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) (Procedencia 2019-11-15 [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tesla\\_Model\\_S\\_\(Facelift\\_ab\\_04-2016\)\\_trimmed.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tesla_Model_S_(Facelift_ab_04-2016)_trimmed.jpg))*

---

Juan Francisco Susarte Zamora  
Álvaro Doural  
Juanjo Martínez

## Paquetes



*Paquete de baterías Model 3*

A diferencia de la celda y el módulo, el paquete de baterías es un dispositivo inteligente que puede ser controlado por el Sistema de Administración de la Batería (BMS por sus siglas en Inglés) para maximizar el rendimiento, garantizar un funcionamiento seguro, y adaptar su salida para evitar la degradación excesiva de la capacidad de rendimiento a largo plazo.

Las celdas se convierten en módulos mediante la adición de marcos mecánicos, Bus Bars, el interfaz de refrigeración, y un arnés de sensores. Cada uno de estos elementos cuenta con un soporte adicional para transformar los módulos en un paquete de baterías inteligente y seguro.

Los marcos mecánicos de los módulos se interconectan con la estructura mecánica de la batería. Esta estructura debe soportar un paquete de baterías de más de 600kg, esto proporciona suficiente rigidez y resistencia para el resto del vehículo, mejorando la dinámica de conducción y la seguridad en caso de choque.

Los módulos se conectan eléctricamente mediante barras colectoras (Bus Bars) de alto voltaje, además de una conexión térmica a través del sistema de refrigeración con la combinación de tubos rígidos y flexibles.

El arnés de sensores se encarga de alimentar la BMS, que actúa como controlador para el sistema de la batería para maximizar el rendimiento y la seguridad.

Además, la batería incluye fusibles para evitar que se produzca una subida de tensión excesiva, un contacto para activar y desactivar la batería del resto del vehículo, y un conector Input-Output I/O de entrada y salida para conectar eléctrica y térmicamente la batería al vehículo.

---

El paquete de baterías de 100kWh del *Model S* y *X* en realidad posee una capacidad de energía absoluta de 102,4kWh. Las 8.256 celdas del tipo 18 650 están dispuestas en una configuración de 96s 86P con un voltaje nominal de aproximadamente de 400V.

El peso de la batería es de 641kg, lo que resulta en una densidad de energía gravimétrica de 182,5W\*kg lo que se traduce en que el 63% de la batería es la masa de las celdas.

La capacidad de energía se calcula multiplicando la capacidad de la celda por la tensión nominal del paquete y el número de celdas en paralelo.

$$E = \text{Capacidad de la celda} \times V_{\text{nominal paquete}} \times \text{Celdas en Paralelo}$$
$$E = 3,4Ah \times 400V \times 86P = 116.9kWh$$

La densidad de energía gravimétrica de la batería es simplemente dividir la capacidad de energía por la masa de la batería.

$$DEG = \frac{E}{\text{masa de la batería}} = \frac{116.9kWh}{641kg} = 182,5W*kg$$

Dado que conocemos la masa definida de cada celda, también podemos derivar que son aproximadamente 404kg de la batería, por lo tanto, 237kg de la batería son de componentes que no son celdas.

$$\text{Masa total de las celdas} = (96s * 86P) * 49g = 404,5kg$$

$$\frac{404,5kg}{641kg} = 0,63 = 63\%$$

La potencia máxima que Tesla puede extraer de su batería es de 567kW. La potencia de salida de nuestra batería se ve afectada principalmente por nuestro voltaje, que se define por el voltaje de una celda y por el número de estas en serie, la corriente máxima de celda, y de la resistencia de la batería.

La potencia alfa ( $P\alpha$ ) es simplemente el voltaje de la batería multiplicado por la intensidad de corriente de la misma.

$$P\alpha = V * I$$

---

El voltaje de la batería (V) cuando esta está emitiendo energía será menor que cuando esté el circuito abierto (Vca), esta diferencia es conocida como voltaje delta (V $\delta$ ).

$$V = V_{ca} - V\delta$$

V $\delta$  se calcula multiplicando la intensidad máxima de las celdas combinadas por la resistencia de la batería.

$$V\delta = I * R$$

Por tanto, para calcular la potencia máxima de la batería primero debemos conocer su resistencia. La resistencia de las celdas se ve muy afectada por factores como el cambio de estado, la temperatura o la velocidad de descarga. Para simplificar utilizaremos un valor para una descarga de 10 segundos de 1C a 25°C. La resistencia de una celda será de aproximadamente 30m $\Omega$ .

La resistencia del enlace de cable (Rec) que conecta las celdas a las Bus Bar es aproximadamente de 1m $\Omega$  por unión. Cada Bus Bar tiene una resistencia aproximada de 0,1m $\Omega$  a temperatura ambiente.

La resistencia de una serie (Rserie) es, por lo tanto, la resistencia de la celda (Rcelda) más el doble de la resistencia del enlace del cable, ya que habría una unión tanto en el terminal positivo como en el negativo, todo esto dividido por el número de celdas en paralelo.

$$R_{serie} = R_{celda} + (2 * R_{ec}) / \text{número de celdas en paralelo}$$

$$R_{serie} = 30m\Omega + (2 * 1m\Omega) / 86 = 0,372m\Omega$$

La resistencia del módulo (Rmódulo) es la resistencia de la serie más la mitad de la resistencia del Bus Bar, todo multiplicado por el número de celdas en serie dentro del módulo que como en el punto anterior (los módulos) mencionamos eran 6.

$$R_{módulo} = (R_{serie} + (R \text{ del Bus bar} / 2)) * \text{número de celdas en serie}$$

$$R_{módulo} = (0,372m\Omega + (0,1m\Omega / 2)) * 6 = 2,53m\Omega$$

Además de la resistencia del módulo, también tenemos la resistencia de los Bus Bar de alta tensión que conectan los módulos, ésta es de aproximadamente 0,02m $\Omega$ . La resistencia del contacto de alto voltaje es de 0,20m $\Omega$ . La resistencia del fusible es de 0,23m $\Omega$ . La resistencia del shunt que permite al BMS medir la intensidad de corriente del paquete es de 0,05m $\Omega$  y la resistencia del conector de alto voltaje es de 0,2m $\Omega$ .

Entonces, la resistencia total del paquete se calcula como la resistencia del módulo (Rmódulo) multiplicada por el número de módulos en serie (Ms), más la resistencia de los Bus Bar de alta tensión por el número de módulos en serie menos la intensidad de estos, más la resistencia del contacto (Rct), más la resistencia del fusible (Rfus), más la resistencia del shunt (Rsh) y más la resistencia del conector de HV (RCHV).

---

$$RT = (R_{\text{módulo}} * Ms) + (R_{\text{de HV Bus Bar}} *(Ms - I)) + R_{ct} + R_{fus} + R_{sh} + R_{CHV}$$

Esto nos da como resultado una resistencia del paquete de 41,8mΩ.

La resistencia de las celdas representa aproximadamente el 80% de la resistencia total de la batería.

Con esta información podemos deducir que con una potencia máxima de salida de 567kW, la intensidad de nuestro paquete de baterías será de unos 1.800A a 2.000A dependiendo del estado de carga y de la temperatura de la celda.

Esto da como resultado una intensidad de corriente de celda de unos 21A a 23A, lo que es equivalente a 6,2C a 6,7C por celda como un pico de potencia de corta duración.

A continuación veremos la estructura del paquete de baterías.



*Estructura mecánica de un paquete de baterías*

La estructura mecánica del paquete sostiene los más de 600kg de la batería además de ser la base para el soporte del resto del vehículo. Está diseñado para proporcionar suficiente rigidez, para permitir que el vehículo posea una buena dinámica de conducción y pase las pruebas de un Crash Test.

Los largueros longitudinales más gruesos aportan resistencia al impacto lateral y a la flexión longitudinal, mientras que los travesaños aportan una rigidez torsional adicional y también aportan resistencia al impacto lateral. También Tesla colocó más secciones internas para separar físicamente cada módulo, lo que es útil para prevenir la propagación de un incendio en caso de que hubiese un fallo.

Una serie de resultados de un test realizado en 2015 muestran lo que sucede a una celda cuando se somete a penetración por clavos, cuando se mantiene a temperaturas muy altas durante periodos prolongados de tiempo. Estos resultados bajo los requisitos de EEUU demostraron que el fuego es posible, por tanto, es importante contar con una estrategia de supresión de incendios para la batería.

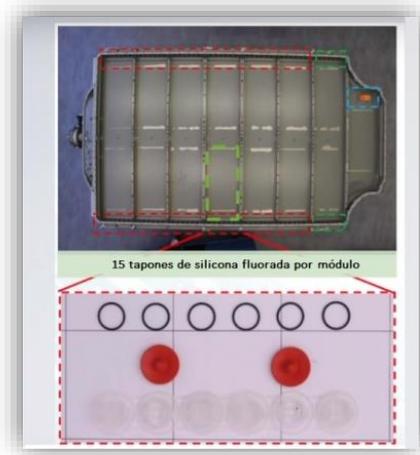


*Celda perforada*



*Celda sometida a alta temperatura*

Por eso vemos cómo es esta estrategia.



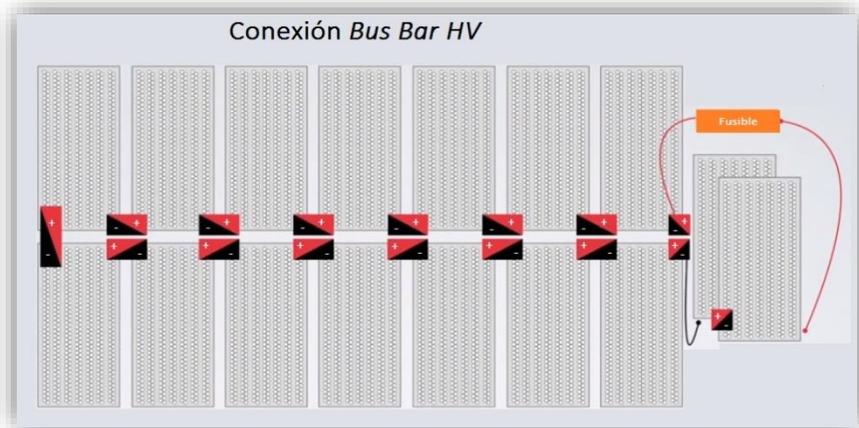
***Separación física entre módulos (parte superior) y los tapones de silicona fluorada (parte inferior).***

Comenzando con los módulos, están separados con unas láminas de mica que se colocan alrededor del módulo para proporcionar un aislamiento eléctrico entre estos, pero estas hojas son también muy estables hasta temperaturas de 900°C, por lo tanto, en caso de un fallo en una celda no se descompondrá inmediatamente y se mantendrá un adecuado aislamiento eléctrico de módulo a módulo.

También los módulos están separados por la parte superior e inferior por unas láminas de metal que mantienen la batería unida. Además tiene una capa de aislamiento de 9,3mm de espesor que evita el paso directo de calor en el habitáculo.

En caso de fallo en una celda se generará una presión de gas significativa, por tanto, es importante tener una ventilación a nivel de paquete. Ya que cada módulo está físicamente separado, cada uno debe tener sus propios orificios de ventilación, a excepción de los dos módulos de la parte frontal que están apilados uno encima del otro y comparten los puertos de ventilación.

En estos orificios se utilizan tapones de silicona fluorada que permiten un buen sellado a la batería al no degradarse fácilmente con la edad. Cuando existe una presencia de gases calientes, estos se descomponen rápidamente permitiendo el paso a través de los orificios.



Los Bus Bar de alto voltaje conectan los 16 módulos en serie como podemos ver en la imagen de la izquierda, la parte roja es el terminal positivo y la negra el negativo.

Estos Bus Bar son de estaño chapados en cobre, tienen un área de sección transversal de 75mm<sup>2</sup>, más largas que las utilizadas para unir los módulos frontales apilados, que se conectan a través del fusible principal.

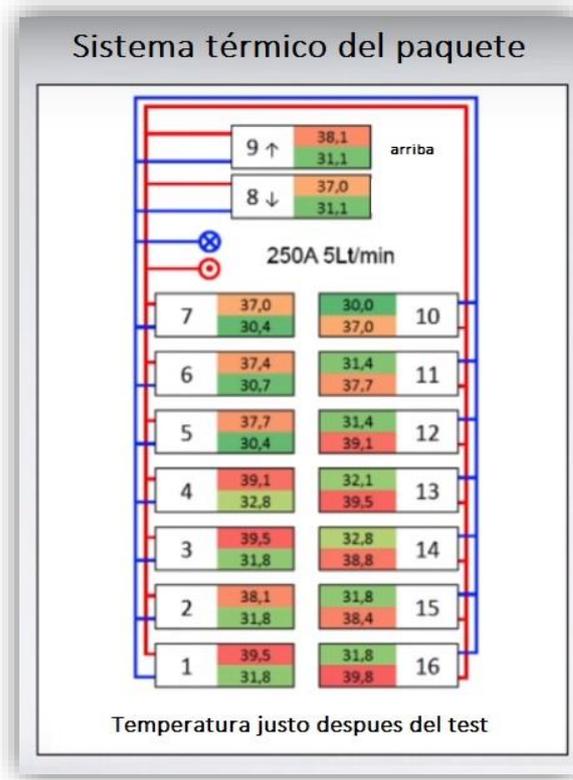
Para finalizar con los paquetes continuamos con la refrigeración de estos.

Los resultados de las pruebas realizadas por AVL en el paquete de baterías de 100kWh aportan buena información sobre el sistema de enfriamiento.

La prueba consistía en ciclos repetidos de carga y descarga de 250A hasta que se alcanzara una temperatura estable. 250A son aproximadamente 90kW. La prueba comenzó a 20°C con un flujo de refrigerante de 5L/m.

En este diagrama el lado frío del refrigerante se muestra en azul, y el caliente en rojo.





El refrigerante se divide desde la entrada para dar servicio a los 16 módulos en paralelo. El lado caliente de cada módulo se conecta en paralelo a la salida caliente de la batería. Cada módulo tiene dos sensores NTC, que permiten medir la temperatura tanto de la entrada como de la salida de refrigerante.

Es importante minimizar la variación de temperatura de la celda, ya que cuanto más calientes estén, antes se degradarán.

Podemos apreciar en la imagen que bajo las condiciones antes nombradas surgen diferencias significativas de temperatura, llegando a los 8 grados de diferencia entre la entrada y la salida como podemos ver en el módulo 16. Además de casi 10 grados de diferencia en el total del paquete.

Esta diferencia de temperatura en los módulos aparece por la forma en la que el refrigerante circula entre las celdas, al ser en forma de "S" este se va calentando hasta salir. Como hemos visto anteriormente en la refrigeración de los módulos, Tesla ya ha comenzado a sustituir este sistema de refrigeración que hasta ahora montan el Model S y el Model X, por el que ya monta el Model 3.

## Conclusiones

Las celdas 21 700 son el futuro a corto plazo de las celdas de Tesla, que dejará de montar las 18 650, acción que ya ha puesto en marcha tanto en el próximo *Model 3* como en los Power Wall.

---

Según Elon Musk, de Tesla, éstas serán las más baratas y con mayor densidad energética del mundo.

Tesla ha apostado por estos formatos de batería, al contrario que otros fabricantes tradicionales. La intención de la marca californiana es reducir los costes significativamente con este tipo de celda. Lo que sin duda alguna ya ha conseguido que sea el líder en el sector de vehículos 100% eléctricos.

La tecnología de las baterías de Tesla pasará a la historia como un avance tecnológico clave, que ha irrumpido en la industria automotriz y que en poco más de cinco años desde el lanzamiento de los estudios originales del *Model S* demuestran que la vida útil y el rendimiento de la batería en el mundo real es muy eficiente, y que continuarán superando expectativas.

El futuro de esta tecnología se basa en conseguir una batería capaz de almacenar una cantidad de energía grande en un espacio cada vez más pequeño, además de resolver el principal



inconveniente de los vehículos eléctricos a ojos de los usuarios que no es otro que la autonomía y el tiempo de carga de estos coches.

Con los avances que se están realizando en el estudio de las celdas, que cada vez almacenan más cantidad de energía por un mayor tiempo, y con las posibilidades que los ultra condensadores abren, no tardaremos en ver coches con una autonomía igual o superior a la de un vehículo de combustión interna, y además con unos tiempos de carga mucho más rápidos.

---

**APUNTES:**



Las opiniones e informaciones vertidas en este documento son responsabilidad de los socios del proyecto 'Un paso adelante II' y en ningún caso representan aquellas de la UE.