



Universidad de  
Oviedo



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE  
GIJÓN**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA  
INDUSTRIAL**

**ÁREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE  
ESTRUCTURAS.**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Diseño multiobjetivo de un paquete de baterías  
modular para vehículo eléctrico**

**Julio 2020**

**ALUMNO: TOMÁS MONTES TORRE**

**TUTOR: MARÍA JESÚS LAMELA REY**

**COTUTOR: IBAN DÍAZ OCHANDIANO**

## ÍNDICE

1. Introducción .....	4
1.1. Motivación y antecedentes.....	4
1.2. Objetivo y alcance .....	5
2. Diseño modular multiobjetivo .....	6
2.1. Metodologías de diseño .....	6
2.2. Diseño de arquitecturas modulares .....	8
2.2.1. Clasificación modularidad .....	9
2.2.2. Ventajas de una arquitectura modular. ¿Arquitectura integral o modular?.....	11
2.2.3. Ejemplo de arquitecturas modulares.....	12
2.3. Estado del arte de metodologías para definir módulos.....	17
2.3.1. Método heurístico de estructura funcional del producto .....	18
2.3.2. Desarrollo de la función modular ( <i>Modular Function Deployment, MFD</i> ).....	20
2.3.3. Matriz de estructura de diseño ( <i>Design Structure Matrix, DSM</i> ).....	21
2.3.4. Otros métodos .....	26
2.3.5. Comparaciones entre métodos .....	29
2.4. Definición de interfaces en arquitectura modular.....	30
2.5. Métodos Multiobjetivo .....	33
2.6. Proceso de diseño de una arquitectura modular .....	35
3. CASO DE ESTUDIO: Paquete de baterías modular para vehículo eléctrico	37
3.1. Introducción del producto y objetivos que se pretenden conseguir.....	37
3.1.1. Ventajas del uso de una arquitectura modular. ....	38
3.2. Requisitos necesarios y limitaciones del producto .....	40
3.2.1. Aislamiento a las vibraciones .....	41
3.2.2. Embalamiento térmico.....	41

3.2.3. Resistencia al impacto .....	43
3.2.4. Normativa / Patentes .....	43
3.3. Identificación y aplicación de la metodología de modularidad más adecuada .....	45
3.4. Estudio soluciones técnicas .....	49
3.4.1. Celda de ion de litio .....	49
3.4.2. Módulo de baterías .....	51
3.4.3. Paquete de baterías .....	54
3.4.4. Interfaz mecánica .....	57
3.4.5. Interfaz eléctrica .....	62
3.4.6. Interfaz de control y comunicación .....	63
3.4.7. Interfaz térmico.....	64
3.5. Ejemplos de paquetes de baterías para vehículos eléctricos.....	66
3.5.1. Autobús MAN .....	66
3.5.2. AKASOL .....	68
3.5.3. Otros paquetes .....	70
3.6. Esquema modular conceptual del paquete de baterías.....	72
4. Diseño del paquete de baterías modular .....	74
4.1. Características del producto.....	74
4.2. Detalle del diseño del paquete de baterías .....	75
4.2.1. Sistema de control de las baterías .....	75
4.2.2. Sistema de gestión térmica .....	77
4.2.3. Contenedor (housing) .....	79
4.2.4. Módulos .....	81
4.2.5. Conexiones del paquete .....	86
4.3. Evaluación del diseño .....	88
5. Conclusiones y líneas futuras .....	92

5.1. Conclusiones.....	92
5.2. Líneas futuras.....	93
6. BIBLIOGRAFÍA .....	94

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Fin de Máster ha sido llevado a cabo desde el departamento de Fabricación Avanzada en la empresa IKERLAN. Se trata de un centro tecnológico situado en el País Vasco líder en la transferencia de conocimiento y en la aportación de valor competitivo a las empresas. Es una cooperativa miembro de la Corporación Mondragón y está vinculado al Basque Research and Technology Alliance (BRTA).

### 1.1. Motivación y antecedentes

En los últimos años, el número de vehículos eléctricos se están viendo incrementado exponencialmente. Uno de los campos en los que se está centrando el desarrollo es en las baterías. El estudio y mejora de este tipo de tecnología es una necesidad y una realidad. Uno de los aspectos fundamentales que tiene gran influencia en el comportamiento de las baterías en un vehículo es el diseño e integración de estas.

Desde IKERLAN ya se han realizado algunos proyectos relacionados con el diseño de baterías, pero, hasta ahora, no se ha tenido una presencia relevante en el desarrollo de baterías para vehículos eléctricos. A pesar de ello, procurando estar siempre en la vanguardia, en vistas del gran impacto que puede suponer la mejora de las baterías en la movilidad en los próximos años, desde IKERLAN se lleva tiempo trabajando en el estudio de baterías desde el departamento de energía y electrónica de potencia. En este marco, acaban de desarrollar un sistema de control de baterías (Battery Management System, BMS).

En este contexto, se le encarga al departamento de fabricación avanzada, el diseño de un demostrador para probar el correcto funcionamiento del BMS desarrollado desde el departamento de energía y electrónica de potencia.

Por otro lado, desde el área de diseño, en estos momentos se está siguiendo una línea de investigación en relación con el desarrollo de distintas metodologías de diseño y el diseño multiobjetivo. Para ello, se valora el diseño de arquitecturas modulares como uno de los factores clave para la integración de diferentes objetivos. Para el diseño de una arquitectura modular existen distintas metodologías con distintas ventajas e inconvenientes. Aunque el uso de arquitecturas modulares es usado en la industria del

automóvil, los paquetes de baterías suelen ser diseñados específicamente para cada vehículo o, como mucho, para una familia de vehículos.

Todo ello ha motivado la realización del presente trabajo pues, el diseño de una arquitectura modular para un paquete de baterías, puede ayudar a cumplir los múltiples objetivos que se le requieren a un paquete de baterías en un vehículo eléctrico.

## 1.2. Objetivo y alcance

Este trabajo tiene como principal objetivo aplicar una metodología de diseño modular al diseño de un paquete de baterías para una aplicación de un vehículo eléctrico.

Para cumplir este objetivo, una de las dificultades que se presenta es la falta de una metodología de diseño modular ideal que integre distintos objetivos. Por ello, en primer lugar, se hará un estudio general del diseño de arquitecturas modulares. En esta primera fase, se realizará una introducción al diseño de arquitecturas modulares y se hará un estudio del arte de las diferentes metodologías de diseño modular. Se tendrá como resultado la propuesta de una metodología de diseño modular. Esta metodología debe tratar de englobar aspectos tales como la caracterización de interfaces o el diseño multiobjetivo.

Una vez establecida la metodología de diseño, el siguiente paso sería utilizarla en un caso de estudio, en este caso, el diseño de un paquete de baterías modular. La aplicación de la metodología propuesta se lleva a cabo en una etapa de diseño conceptual y requerirá de un estudio previo sobre el producto a diseñar. Por ello, se tendrá que estudiar varios aspectos relacionados con los paquetes de baterías como los requisitos para la aplicación, las limitaciones, o que soluciones técnicas se pueden aplicar.

Finalmente, se realizarán unas conclusiones sobre la metodología de diseño propuesta y sobre el diseño realizado del paquete de baterías modular utilizando dicha metodología. Además, se marcarán unas líneas futuras de trabajo para tratar los posibles puntos débiles o aspectos sobre los que seguir trabajando.

## 2. DISEÑO MODULAR MULTI OBJETIVO

El diseño modular multiobjetivo engloba diferentes aspectos. En función de ellos se ha dividido este capítulo. En primer lugar, se describirá el concepto de diseño, su importancia, las etapas que lo componen y metodologías de este. En segundo lugar, se introducirá el diseño modular, el concepto de interfaz y se mostrará un estado del arte de metodologías para definir módulos. En tercer lugar, se explicará en lo que consiste los métodos multiobjetivo y cuál es su finalidad. Por último, se muestra el proceso que se utilizará para diseñar una arquitectura modular.

### 2.1. Metodologías de diseño

La etapa de diseño es fundamental en el proceso de desarrollo de todo producto. Aunque solo consume aproximadamente un 10% del presupuesto del proyecto, se definen aproximadamente el 80% de los costes de fabricación del producto [1]. La etapa de diseño se pueden dividir en cuatro fases [2]:

1. Definición del problema y análisis de las necesidades del cliente.
2. Diseño conceptual: los requerimientos son trasladados a funciones y características del producto.
3. Diseño de realización (*Embodiment desing*).
4. Diseño de detalle: conceptos que puedan satisfacer los requerimientos son generados y modelados.

Debido a la gran importancia del diseño, se han desarrollado en los últimos años diferentes metodologías de diseño para tratar de optimizar esta etapa del proyecto. Una definición de lo que es una metodología de diseño puede ser:

*“La Metodología del Diseño se entiende como una serie de acciones concretas para el diseño de sistemas técnicos que derivan su conocimiento de la ciencia del diseño y la psicología cognitiva, y de la experiencia práctica en diferentes dominios. Incluye planes de acción que vinculan los pasos de trabajo y las fases de diseño según el contenido y la organización. Estos planes deben ser adaptados de manera flexible a la tarea específica que se está realizando. También incluye estrategias, reglas y principios para alcanzar objetivos generales y específicos, así como métodos para resolver problemas de diseño individuales o tareas parciales” [2].*

Estas metodologías engloban los que se conoce como Diseño para la Excelencia (DfX, *Design for excellence*). El Diseño para la Excelencia permite desde un enfoque objetivo y mediante un proceso de diseño guiado que el producto final diseñado cumpla con una serie de características óptimas.

Diferentes Diseños para la Excelencia han sido desarrollados en los últimos años para ayudar a los diseñadores durante el proceso de diseño y en la etapa de ingeniería del producto. Métodos como el Diseño para Ensamblaje (DfA, *Design for Assembly*) son conocidos y están ampliamente extendidos en varias industrias. El DfA puede reducir los costes y tiempos de fabricación [3]. Algunos de los DfX más conocidos son[4, 5]:

- Diseño para la calidad (DfQ, *Design for Quality*)
- Diseño para la obsolescencia (*Design for Obsolescence*)
- Diseño para la seguridad (DfS, *Design for Safety*)
- Diseño para la fabricación (DfM, *Design for Manufacturing*)
- Diseño para el ensamblaje (DfA, *Design for Assembly*)
- Diseño para la fabricación y el ensamblaje (DfMA, *Design for Manufacturing and Assembly*)
- Diseño para el reciclaje (DfR, *Design for Recycling*)
- Diseño para el medioambiente (DfE, *Design for Environment*)
- Diseño para la mantenibilidad (*Design for Maintainability*)
- Diseño para el desmontaje (DfD, *Design for Disassembly*)

Uno de los mayores inconvenientes de las metodologías DfX es la dificultad de hacer converger las soluciones que dan todos ellos por separado para que funcionen como una única herramienta global. Hasta la fecha, a excepción de la integración de DfA y DfM, la combinación de dos o más metodologías DfX no ha sido estudiada en la literatura más allá de casos concretos. Esto se debe a que las DfX son a menudo interdependientes y a veces contradictorias. Es casi imposible para el desarrollador del producto examinar el campo completo. Por ello, para poder optimizar muchos atributos a la vez (ensamblaje, fabricación, reciclabilidad, mantenibilidad...), es necesario recurrir a desarrollar sus productos desde un enfoque **multiobjetivo**.

El diseño multiobjetivo es utilizado para distinguir lo que es más deseable en un diseño. Antes de buscar un diseño óptimo, es importante identificar las características que

más contribuyen al valor general del diseño. El diseño de un producto suele envolver múltiples criterios/objetivos como pueden ser, costes de inversiones, costes de operación, beneficio, calidad, eficiencia, seguridad del proceso, tiempo de fabricación... Por tanto, en aplicaciones reales, la conveniencia de un diseño es medida con respecto a múltiples objetivos, los cuales, suelen estar en conflicto.

Para facilitar el optimizado de los objetivos que se pretendan alcanzar, de manera concurrente, se define un diseño con **una arquitectura modular** [6].

## 2.2. Diseño de arquitecturas modulares

En ingeniería, se entiende como modularidad la descomposición de un producto/servicio en módulos, siendo dichos módulos unidades o “bloques” que realizan por sí mismos una o varias funciones dentro del producto/servicio, interconectándose con los demás **mediante interfaces** [7].

La complejidad de un producto/servicio está relacionada con el número de elementos diferentes, la naturaleza de las interdependencias entre estos y la forma en que interactúan [8, 9]. Utilizando una arquitectura modular se reduce dicha complejidad simplificando productos, que en otros casos serían un sistema de interconexiones inmanejable, en subsistemas más pequeños e independientes que funcionan como un todo [10]. Al mismo tiempo que se reduce la complejidad, aumenta la variedad ofrecida de productos y servicios.

En una arquitectura modular, los componentes deben ser autónomos, poco acoplados y actualizables individualmente [11]. Además, deben de poder ser fácilmente ensamblados [12] [13]. Cada módulo se especializa en cumplir una función específica y debe poder modificarse sin influir en los otros módulos [12, 14].

El diseño de arquitecturas modulares permite que los procesos de diseño posteriores sean independientes y se distribuyan entre diferentes grupos de diseñadores [15].

El diseño de una arquitectura modular se lleva a cabo en la fase de diseño, pero repercute en todas las fases del ciclo de vida del producto. La manera en que un producto es dividido en módulos tiene un gran efecto en su montaje, desmontaje, servicio y retirada [16].

Aunque es deseable formar módulos al principio del proceso de diseño, la información necesaria para formarlos a veces podría no estar disponible. Esto puede causar que los módulos diseñados no sean adecuados más adelante cuando se añadan más restricciones al diseño. Por lo tanto, la disponibilidad de información es crucial durante la identificación de los módulos [17].

Existen distintas metodologías para descomponer el producto en módulos. En el subcapítulo 2.3 se hace un estado del arte sobre ellas. Para un subconjunto de componentes pueda ser considerado un módulo debe tener cierto nivel de estandarización e intercambiabilidad [7, 18].

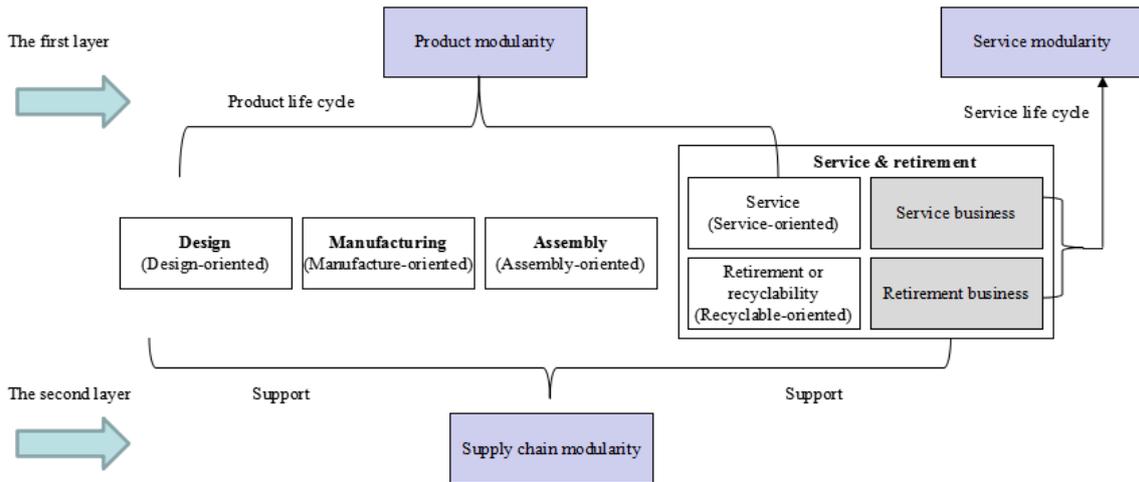
La existencia de **interfaces** caracteriza todos los componentes que se montaran pero solo cuando el componente tiene un cierto nivel de estandarización con su interfaz puede ser considerado un módulo [18]. Por tanto, los módulos poseerán especificaciones estandarizadas para su conexión mediante interfaces [19]

Debe tenerse en cuenta que, al dividir la estructura de un producto en partes más pequeñas y manejables, no se busca el diseño con un menor coste o el más eficiente, sino un producto flexible que permita cambios en su estructura con la mayor simplicidad posible.

### 2.2.1. Clasificación modularidad

El concepto de modularidad es aplicable a varios ámbitos dentro de la ingeniería como modularidad de producto, servicio y cadena de suministro. Como se muestra en la Figura 1 los distintos ámbitos de modularidad están relacionados y pueden dividirse en dos capas. La primera alberga la modularidad de producto y servicio y la segunda capa la cadena de suministro [20].

Además, cada ámbito puede estar más orientado a otro criterio como el diseño, la fabricación, el ensamblaje, la reciclabilidad... [20].



*Figura 1: Esquema de los distintos ámbitos de modularidad [20].*

Algunos estudios ya han tratado de clasificar los distintos tipos de modularidad. La modularidad es poliédrica y puede ser abordada desde diferentes perspectivas, es por ello que, cada autor suele proponer un criterio de clasificación distinto. En la Tabla 1 se recogen algunas clasificaciones existentes según distintos criterios[20].

Criterio de clasificación	Tipos de modularidad
1) Según la función del módulo en el sistema	Módulos de función (básica, auxiliar, especial, adaptativa y específica del cliente) [2].
	Módulo no físico (software) [21]
2) Según los cambios que permite el módulo	División, sustitución, aumento, exclusión, inversión y portabilidad. [22]
3) Según el ensamblaje estructural de componentes y compatibilidad de interfaz	Modularidad de intercambio de componentes, de componentes compartidos, de fabricación a medida, de bus, modularidad seccional, modularidad de ranura. [12]
4) Según la etapa del ciclo de vida o interacción con el entorno del sistema.	1 Modularidad del producto: puede estar orientada al diseño, a la fabricación, al uso, al servicio o a la retirada.
	2 Modularidad de fabricación 3 Modularidad de servicio [23]
	Perspectiva de fabricación, perspectivas de servicio, perspectivas de reciclabilidad [24]
5) Según dominios principales	Modularidad en el diseño, en la producción y en la organización o modularidad en la organización y la cadena de suministro y modularidad de uso [25]

6) Modularidad para arquitecturas de familia de productos para personalización masiva	Modularidad funcional, modularidad técnica, capacidad de fabricación [26].
	Modularidad mediante fabricación, modularidad mediante estandarización [27].

Tabla 1. Distintos criterios de clasificación la modularidad

### 2.2.2. Ventajas de una arquitectura modular. ¿Arquitectura integral o modular?

La arquitectura de un producto puede definirse como la forma en que los elementos funcionales de un producto se organizan en unidades físicas y la forma en que interactúan estas unidades [1]. Por lo tanto, es bastante obvio que todos los productos tienen algún tipo de arquitectura, incluso si no necesariamente se ha considerado durante la fase de diseño.

Se conocen dos alternativas de arquitecturas de productos: Arquitectura modular y arquitectura integral. Son inversamente proporcionales, cuanto más modular sea un sistema, menos integral será [28]. Comparando ambas arquitecturas se pueden entender mejor sus características.

Por lo general, diseñar sistemas modulares es más complejo que diseñar sistemas integrales. Se requiere realizar simultáneamente consideraciones técnicas y estratégicas. Las consideraciones técnicas se relacionan con los componentes físicos y sus interacciones, mientras que las consideraciones estratégicas lo hacen con las similitudes entre módulos y la posibilidad de formar familias, o de ser variaciones de una misma base, de cara a reducir costes de desarrollo y fabricación [7].

En una arquitectura integrada la complejidad de la funcionalidad y de los interfaces compartidos entre los distintos componentes es mucho mayor. No es posible modificar un componente sin alterar el resto y por ello una arquitectura integrada suele diseñarse de forma que se maximicen las posibilidades de éxito.

En Tabla 2 se resumen las diferencias más notorias:

Arquitectura integrada	Arquitectura modular
El grupo de componentes que implementa algunas de las funciones del producto se denomina <b>bloque</b> .	El grupo de componentes que implementa algunas de las funciones del producto se denomina <b>módulo</b> .

Se prioriza la funcionalidad, de forma que el número de interacciones entre los bloques no suele ser limitante.	Las interacciones entre los módulos deben estar bien definidas y suelen ser determinantes.
La mejora del producto tiene un coste elevado.	La mejora del producto no eleva demasiado el coste.
No es posible modificar un sólo bloque.	Puede modificarse algún módulo sin que el resto se vean afectados, siempre que se respeten las interacciones en los módulos
Flexibilidad limitada.	Flexibilidad elevada.

*Tabla 2: Diferencias entre arquitectura integrada y arquitectura modular.*

Si nos centramos únicamente en una arquitectura modular, en Tabla 3 se comparan sus ventajas y desventajas.

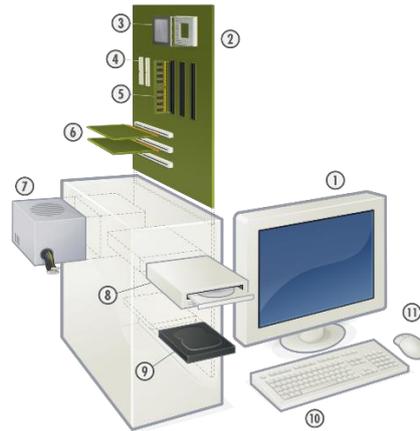
Ventajas	Desventajas
Menor tiempo de implementación de una mejora del producto[29].	Dificultad en la gestión de las relaciones entre los módulos [30].
Apoya la reconfiguración del producto/servicio [31]	Los módulos no están específicamente diseñados para cada producto.
Permite el subensamblaje y la prueba previa de los módulos	Peligro de diseñar módulos redundantes
Costes unitarios más reducidos debido al efecto de las economías de escala[32].	Excesiva capacidad debido a la estandarización. Está diseñado para la aplicación más rigurosa.
Sistema de producción flexible y escalable[8]	
Mayor flexibilidad para los nuevos requerimientos de mercado[29].	

*Tabla 3: Ventajas y desventajas de una arquitectura modular.*

### 2.2.3. Ejemplo de arquitecturas modulares

Parte de los objetos que nos rodean tienen en mayor o menor medida arquitecturas modulares. Además, la modularidad es aplicable a otros ámbitos dentro del campo de la ingeniería, como por ejemplo: cadenas de producción, servicios logísticos o programas informáticos [7].

Un ejemplo de arquitectura modular puede ser un ordenador de sobremesa como el de la Figura 2 [33]. Un ordenador de sobremesa se compone de distintos módulos que realizan una función determinada (por ejemplo, el monitor se utiliza para la visualización). Además, están interconectados por interfaces que en la mayor parte de los casos están estandarizados. Cada módulo puede ser reemplazado o actualizado independientemente.



*Figura 2: Diferentes módulos de un ordenador de sobremesa*

La arquitectura modular ha sido utilizada en construcción desde los años sesenta hasta hoy. Después de la segunda guerra mundial, el gobierno del Reino Unido tuvo la necesidad de fabricar de forma rápida y masiva cientos de miles de hogares para todos los ciudadanos que habían perdido su casa debido a los bombardeos alemanes. Para ello, se fabricaron viviendas modulares como la de la Figura 3. Se trata del modelo AIROH, un bungalow de aluminio de 10 toneladas que se componía de 4 módulos fabricados en serie y ensamblados sobre el terreno [34].



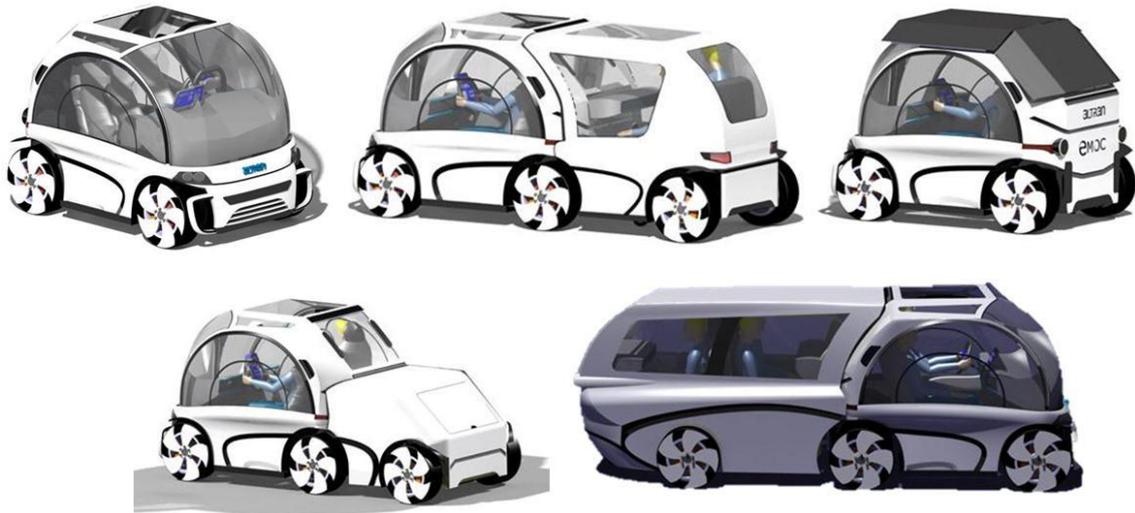
*Figura 3 : Módulo de un bungalow modelo AIROH [34].*

Hoy en día también se utiliza la construcción modular. La construcción de hospitales de emergencia en China en tiempos récords para tratar a los infectados con el coronavirus ha llamado la atención en todo el mundo. En Wuhan (China) se construyó el primero, que se puede ver en la Figura 4, en tan solo 10 días. Se trata de un hospital de 25000m<sup>2</sup> con 1000 camas compuesto por módulos que vienen completamente montados, con sus ventanas e instalaciones [35].



*Figura 4: Hospital modular de emergencia construido en Wuhan(China) [35].*

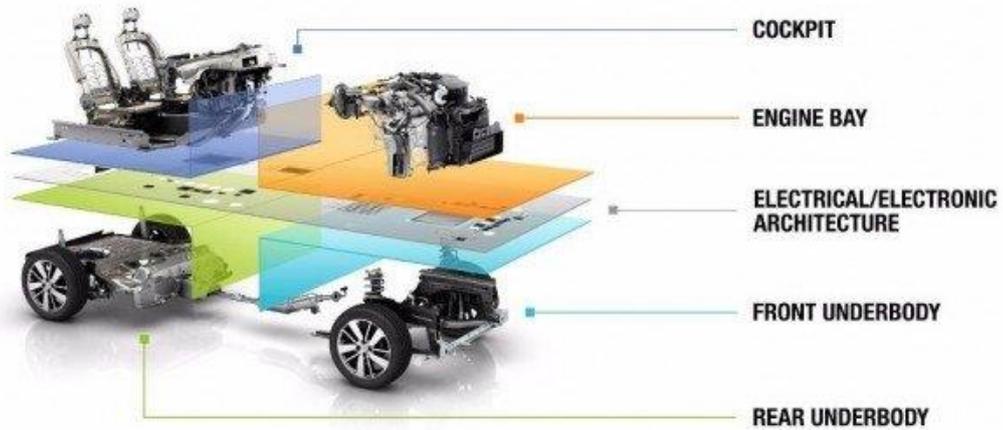
En lo que respecta al campo del automóvil, cuando se habla de vehículos modulares se puede pensar en algo similar a lo de la Figura 5 [36]. Un vehículo que sea como un juego de LEGO en el que puedas ir añadiendo o quitando módulos fácilmente en función de las necesidades que tengas en cada momento.



*Figura 5: Posible ejemplo de vehículo modular: ALTRAN eMOC [36].*

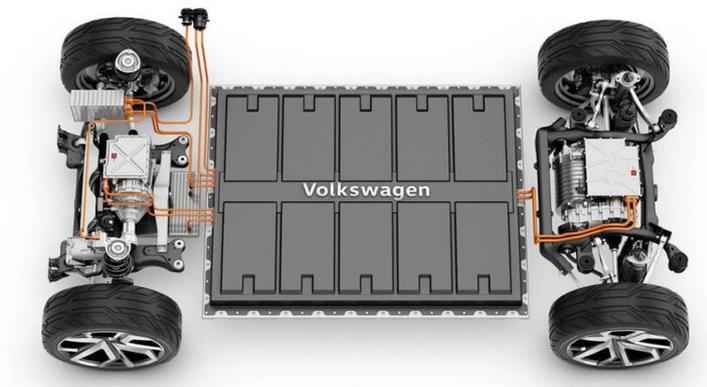
A pesar de ello, es conocido que vehículos del mismo grupo utilizan mismos componentes e incluso mismas plataformas llegando a cambiar únicamente la carrocería entre un modelo y otro. Estas plataformas se caracterizan por mantener ciertos módulos (centrales) estables y la variación se implementa con módulos complementarios (periféricos). Renault utiliza una plataforma llamada CMF (*Common Module Family*) que se muestra en la Figura 6 [37]. Técnicamente, CMF es un sistema modular que consta de cinco bloques intercambiables que se pueden organizar de diferentes formas: compartimento del motor, cabina de mando, parte inferior delantera, parte inferior trasera y una red eléctrica y electrónica común [37].

**COMMON MODULE FAMILY (CMF) : 4+1 BIG MODULES**



*Figura 6: Plataforma CMF (Common Module Family) de Renault [37].*

El uso de estas plataformas es de gran utilidad para vehículos eléctricos pues, cambiando el número de módulos de baterías, puede adaptarse a las necesidades de potencia o autonomía de cada cliente. Algunos ejemplos de estas plataformas se muestran en la Figura 7 [38] (Plataforma MEB, grupo Volkswagen) y en la Figura 8 (plataforma CMF-EV, grupo Renault) [37].



*Figura 7: Plataforma MEB, grupo Volkswagen [38].*

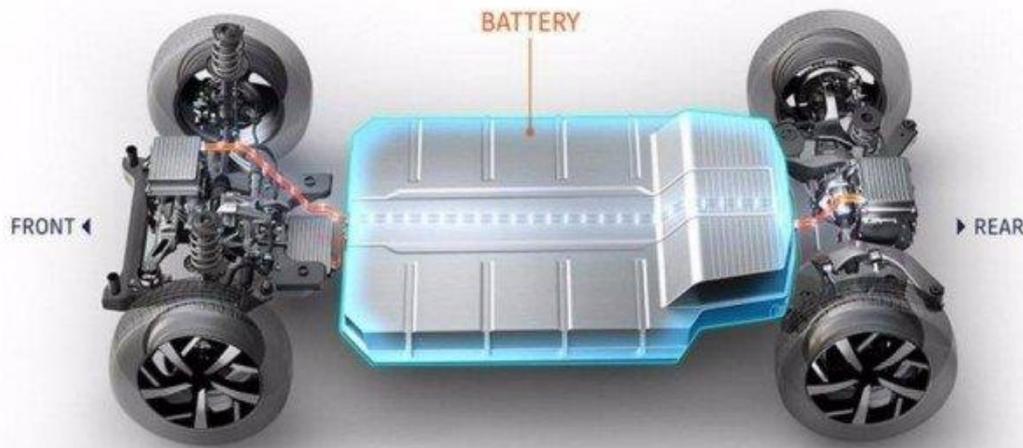


Figura 8: Plataforma CMF-EV, grupo Renault [37].

### 2.3. Estado del arte de metodologías para definir módulos

Para desarrollar productos modulares varios autores han propuesto diferentes metodologías. Algunas de ellas carecen de un punto de vista integrado entre el producto y su fabricación [39], otras se enfocan más en el campo de negocio con diferentes variedades de productos [40, 41].

Existe tal variedad de métodos para modularizar un sistema que varios autores han tratado de clasificarlos. Por ejemplo, en [42] clasificaron los métodos de modularización de productos en cinco categorías distintas: 1) métodos de agrupamiento, 2) métodos separación con gráficos y matrices, 3) métodos de programación matemática, 4) métodos de inteligencia artificial y 5) algoritmos genéticos y heurísticos. Otras clasificaciones como en [43] clasifican los métodos simplemente en dos categorías: métodos basados en funciones y métodos basados en matrices

El método más tradicional para modularizar un sistema es descomponerlo en módulos más pequeños basados en funciones, donde los módulos individuales realizan funciones específicas requeridas por el sistema en general [44]. Este enfoque puede ser viable en sistemas que no requieren un alto nivel de transferencia de potencia (fuerza, par, etc.) entre los módulos. Esto se debe al hecho de que a medida que aumenta el tamaño del sistema, aumenta la magnitud de la transferencia de energía, alcanzando así el límite

de la modularidad física [45] [46]. Otros factores que hacen que la descomposición del sistema sea un proceso desafiante son la transferencia de datos e información, que requieren una distribución en todo el sistema por subsistemas (por ejemplo, cableado, sensores, hardware de control, etc.) [45] .

Una solución modular a veces consiste en utilizar una plataforma en la que ciertos módulos (centrales) permanecen estables y la variación se implementa con módulos complementarios (periféricos) [15].

A continuación, se hace un repaso bibliográfico de diferentes metodologías utilizadas en el diseño de una arquitectura modular:

### 2.3.1. Método heurístico de estructura funcional del producto

El método heurístico para diseño modular fue descrito por Stone [51]. Usa la estructura funcional del producto, es decir, un diagrama de bloques de descomposición de todas las funciones del producto y los flujos de material, energía e información entre ellos [2]. Con la estructura funcional del producto, aplica tres heurísticas que ha definido previamente y que se muestran en la Tabla 4 para definir módulos [51].

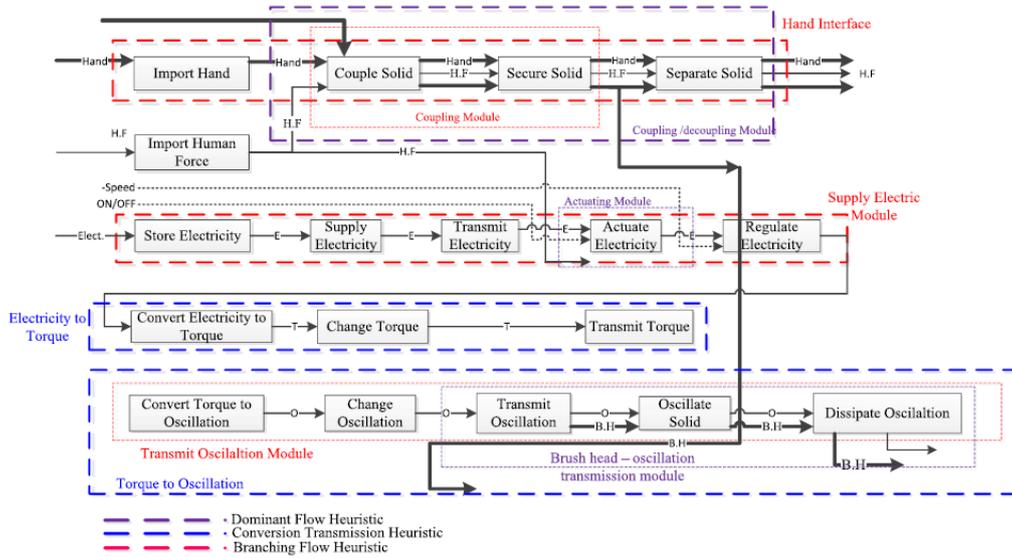
Heurística	Descripción
<b>Flujo dominante</b>	Si el mismo flujo de materia, energía o información atraviesa una serie de funciones, deberán formar un módulo
<b>Flujo de ramificación</b>	Si un flujo se divide en cadenas de funciones paralelas, las subfunciones que forman esas cadenas deberían formar módulos.
<b>Conversión-transmisión</b>	Las funciones que convierten un tipo de flujo en otro deben formar módulos. Si la conversión es seguida por la transmisión, eso debería ser parte del mismo módulo

*Tabla 4: Heurísticas para definir módulos.*

Las heurísticas definen el tamaño máximo de los módulos, luego depende del diseñador dividirlos según sea conveniente. Los principales criterios de modularización considerados en el método heurístico de estructura de funciones son la funcionalidad y las interfaces de módulos. Factores relacionados con el negocio o la estrategia, no están representados en el método, sino que entran en el juicio del diseñador en el lugar donde

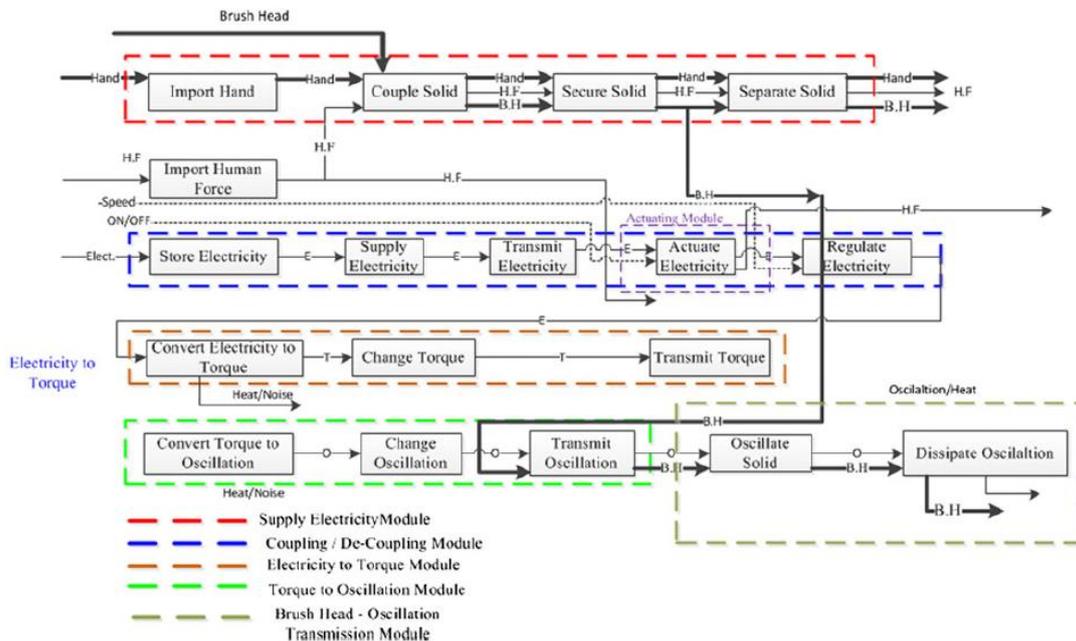
se aplican las reglas. Por lo tanto, la visión y el buen juicio del diseñador pueden entrar en el proceso; esto puede ser algo positivo o negativo.

En la Figura 9 [46] se muestra un ejemplo de la aplicación de las tres heurísticas al diagrama estructural de un cepillo de dientes eléctrico.



*Figura 9: Aplicación de las tres heurísticas al diagrama estructural de un cepillo de dientes eléctrico*

En la Figura 10 [46] se muestra la división que se obtiene de módulos.



*Figura 10: División de módulos final obtenida para el ejemplo del cepillo de dientes*

2.3.2. Desarrollo de la función modular (*Modular Function Deployment, MFD*)

El desarrollo de la función modular (*Modular Function Deployment, MFD*) [47-49] utiliza tres matrices interconectadas, como se muestra en la Figura 11, para describir los requisitos del cliente, las propiedades del producto y la estrategia de la empresa.

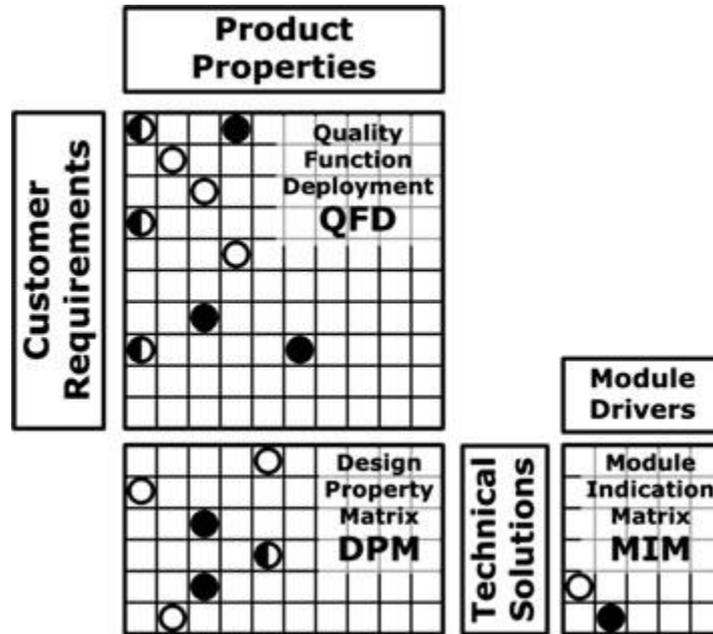


Figura 11: Matrices del método MFD

- Matriz de implementación de funciones de calidad producto (*Quality Function Deployment, QFD*): Es la relación entre los requisitos del cliente y las propiedades del producto [50, 51].
- Matriz de propiedades de diseño (*Design Property Matrix, DPM*). Relaciona las propiedades producto con las soluciones técnicas.
- Matriz de indicación de módulo (*Module Indication Matrix, MIM*) captura la intención estratégica de cada solución técnica o componente. La intención estratégica es específica de la empresa, lo que implica que no existe una sola solución. Este método establece 12 razones para modular (module drivers) que se indican en la Tabla 5.

RAZONES PARA MODULARIZAR	
Desarrollo y diseño de producto	<b>Reutilizable</b> (se espera que no cambie en el futuro y puede reutilizarse en futuras generaciones)
	<b>Evolución tecnológica</b> (partes que probablemente cambien por la variación en las necesidades de los clientes)

	<b>Cambios de producto planificados</b> (partes que la empresa quiere desarrollar y cambiar)
<b>Variación</b>	<b>Diferentes especificaciones</b> (el diseñador debería colocar las variaciones del producto en las menos partes posibles)
	<b>Estilo</b> (Partes que están muy influenciadas por las modas y tendencias, estas partes se usan para subrayar la identidad del producto)
<b>Producción</b>	<b>Unidades comunes</b> (a pesar de que se requiere un alto grado de personalización para productos con variantes, es posible encontrar partes o subsistemas que puedan usarse en toda la variedad del producto)
	<b>Proceso y/o Organización</b> (para hacer que el proceso de producción sea lo más eficiente posible, las partes del producto que tienen el mismo proceso de producción se intentan unir)
<b>Calidad</b>	<b>Revisión por separado</b> (La posibilidad de revisar por separado cada módulo antes del montaje final puede contribuir de manera significativa a mejorar la calidad, principalmente reduciendo las veces que se vuelve atrás)
<b>Comprar</b>	<b>Disponibilidad del proveedor</b> (En vez de comprar componentes individuales, algunos subsistemas pueden ser comprados como módulos estándares del proveedor)
<b>Post-venta</b>	<b>Servicio y mantenimiento</b> (Un servicio y mantenimiento rápido es un requerimiento importante del cliente. Por tanto, las partes que están expuestas a servicio y mantenimiento deberían agruparse juntas y formar los módulos de servicio. Con interfaces inteligentes un módulo dañado puede ser rápidamente reemplazado por otro nuevo).
	<b>Actualización</b> (Diseñar módulos que permitan una actualización futura, dan la posibilidad de que el cliente cambie de producto en el futuro).
	<b>Reciclaje</b> (Para permitir un alto grado de reciclaje, debería limitarse el número de materiales en cada módulo)

Tabla 5: Razones para modular MFD.

### 2.3.3. Matriz de estructura de diseño (*Design Structure Matrix, DSM*)

Uno de los modelos de sistema que se usa ampliamente para el diseño de sistemas modulares es la matriz de estructura de diseño (*Design Structure Matrix, DSM*).[52] El

DSM fue presentado por primera vez por Steward y desde entonces ha sido utilizada ampliamente tanto en el ámbito académico como en la industria [53, 54].

La matriz de estructura de diseño (DSM), en algún lugar también denominada matriz de estructura de dependencia, se utiliza como una herramienta para evaluar las interrelaciones de productos y / o servicios que forman parte de un sistema complejo utilizando varios criterios predefinidos[55].

Además de para su uso en el diseño de productos, también ha utilizado para organizar tareas de procesos u organizaciones. Browning realiza un amplio estado del arte de la matriz DSM y de todas sus aplicaciones con una revisión de más de 1000 referencias. [56] .

Un DSM es una matriz cuadrada donde las celdas diagonales típicamente representan los elementos del sistema (como componentes en un producto, personas en una organización o actividades en un proceso) y las celdas fuera de la diagonal representan relaciones (tales como dependencias, interfaces, interacciones, etc.) entre los elementos [56]. En la Figura 12 se muestra un DSM, en este caso, para secuenciación de tareas.

Una DSM puede considerarse como una forma genérica de mapear interdependencias También se pueden representar en él interacciones espaciales, energéticas, de información y materiales de componentes o funciones [57] [58].

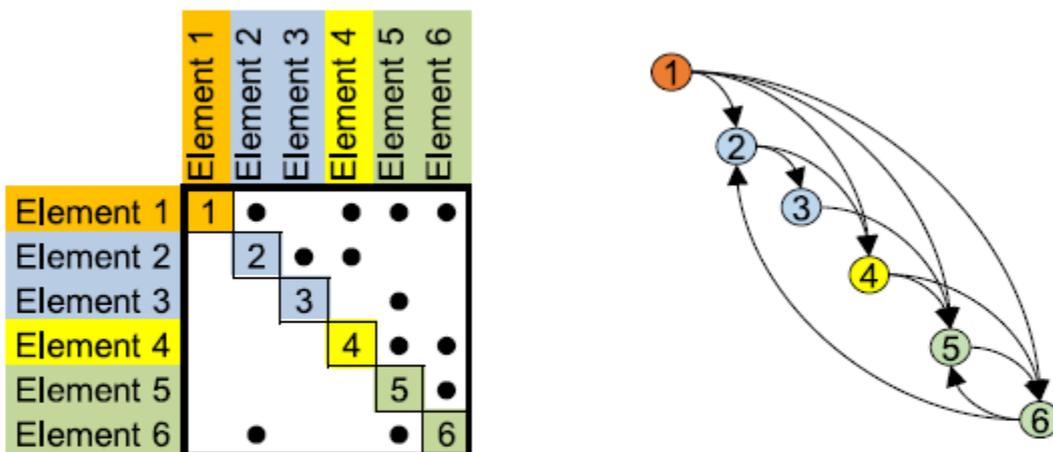


Figura 12. Ejemplo de matriz binaria DSM y su grafo equivalente.

Una vez realizada la matriz DSM se aplica un algoritmo de agrupamiento (clustering) para agrupar las funciones o componentes para que las interacciones dentro

de los grupos se maximicen y entre los grupos se minimicen. Los grupos formados son posibles candidatos de módulo. Hay muchos algoritmos y uno puede desarrollar uno propio para satisfacer las necesidades de un caso específico. La idea básica de un algoritmo de agrupamiento es reordenar las filas y columnas para que todas las marcas estén lo más cerca posible de la diagonal o formen un grupo cerrado con otras marcas [56]. En la Figura 13 se muestra el resultado de aplicar un método de agrupamiento a una matriz DSM.

	1	6	5	4	2	3	7
1		X					
6	X		X				
5	X	X		X			
4			X		X	X	X
2	X			X		X	X
3				X			X
7				X	X	X	

Figura 13: Matriz DSM una vez realizado el agrupamiento. Fuente: [www.dsmweb.org](http://www.dsmweb.org)

El DSM tradicional es una matriz booleana binaria en el que cada elemento de la matriz es 0 o 1, que solo puede reflejar si existe una asociación entre los elementos o no. A lo largo de los años, la matriz DSM ha ido evolucionando. Las interacciones se pueden representar con coeficientes de acoplamiento, según la fuerza de la relación y si la relación es beneficiosa o no deseada como se muestra en la Figura 14[59]. En varios casos, la matriz DSM captura más de un tipo de relación entre componentes pudiéndose usar subceldas o colores diferentes para ello [56].

Se conoce como FDSM a la matriz de estructura de diseño difusa (*Fuzzy Design Structure Matrix*) [60]. Los elementos de la matriz en FDSM tienen un valor en el rango de [0, 1], que puede ser una buena indicación de los grados de dependencia entre las actividades

System Elements	A	B	C	D	E	F	G
A							
B			3		3		
C					2		
D		1			2		
E							1
F	2			3			
G			1			3	

Index:	<b>1</b> : Strong Dependency
	<b>2</b> : Medium Dependency
	<b>3</b> : Low Dependency

Figura 14: Ejemplo de matriz DSM (Design Structure Matrix) [59].

### 2.3.3.1. Algoritmos de agrupamiento (clustering)

Para realizar la división de los módulos existe la posibilidad de utilizar varios algoritmos [61]. Dependiendo de la aplicación, diferentes autores desarrollaron sus algoritmos. Algunos de ellos son de fácil acceso y entendimiento, otros son desarrollos matemáticos más complejos. A continuación, se hará un repaso a los algoritmos que se han encontrado en la bibliografía revisada.

La primera publicación que se presenta describiendo los primeros algoritmos de agrupamiento consta de 1964 realizada por Alexander [62]. Pero no fue hasta 1994 cuando se impulsó el desarrollo de estos acompañando el avance en el diseño de arquitecturas modulares. Eppinger en 1964 [63] propuso la idea de maximizar las interacciones dentro de los módulos y, al mismo tiempo, minimizar las interacciones entre módulos.

Idula en 1995 [64] utiliza por primera vez un algoritmo de agrupamiento estocástico que utiliza este principio en un DSM, con mejoras posteriores presentadas por Gutiérrez Fernández [65] y Thebeau [66]. Este último algoritmo presentado por Thebeau se le conoce por algoritmo Idicula-Gutiérrez-Thebeau (IGTA) [66, 67]. El algoritmo IGTA tiene como objetivo agrupar una matriz cuadrada moviendo componentes individuales de un grupo a otro, al tiempo que minimiza el acoplamiento entre grupos y

maximiza el acoplamiento dentro del grupo. Una descripción completa se puede encontrar en [66].

Blondel et al. [68] presenta en 2008, el algoritmo de detección de la comunidad (CDA). Este algoritmo utiliza dos etapas para detectar "comunidades" para dividir los sistemas en configuraciones modulares óptimas, como lo demostró en la agrupación de dominios web.

Más recientemente, los enfoques de agrupación DSM [69, 70] [71] basados en algoritmos genéticos (GA) se están convirtiendo en el enfoque predominante para la optimización de la familia de productos [72] porque permite múltiples funciones objetivas y puede ejecutarse en entornos informáticos paralelos. Un inconveniente de GA puede ser el tiempo de ejecución.

Otros algoritmos más generales de agrupamiento que se utilizan en distintos campos son:

- Algoritmo de agrupamiento jerárquico (*Clustering* jerárquico): Consiste en formar módulos basados en los criterios de similitud [73]. Cada elemento se asigna a un grupo dado (comenzando con un grupo de un objeto compuesto por el mismo elemento), después de lo cual el algoritmo une de forma iterativa los dos elementos más similares en un grupo basándose en la distancia que entre cada uno de ellos. El proceso continúa de esta manera hasta que haya un solo grupo grande con todos los elementos [74]. Se utilizan dendrogramas, como los de la Figura 15 [75], para ilustrar los resultados.

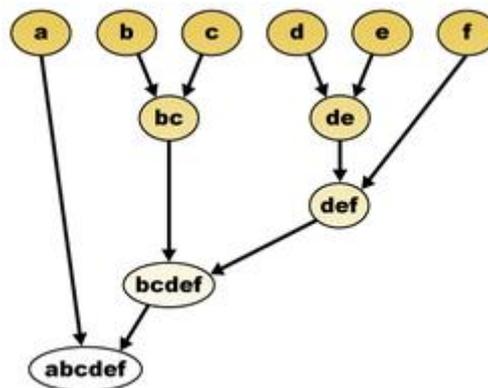


Figura 15: Ejemplo de dendrograma[75].

- K-means: es un algoritmo de clasificación no supervisada (*clusterización*) que agrupa objetos en k grupos basándose en sus características. El agrupamiento se realiza minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o *cluster*. Se suele usar la distancia cuadrática [76].

### 2.3.4. Otros métodos

Los tres métodos mencionados hasta ahora (Método heurístico, MFD, DSM) son los más tradicionales y desde los que han ido surgiendo otros.

Huang y Kusiak propusieron dos métodos diferentes de diseño de sistemas modulares, uno con los gráficos de interacción, [77] y el otro con la matriz de interacción y adecuación [78]; El método de modularidad [78] de Huang y Kusiak (enfoque de descomposición) permite la formación óptima de módulos, incluso en la etapa conceptual, donde no hay información suficiente. Lee et al [79] propusieron un método de diseño de sistema modular basado en el proceso de jerarquía analítica (AHP). La definición de los módulos es preferible hacerla al principio del proceso de diseño, en la etapa conceptual. El problema es que muchas veces se carece de información suficiente. Por ello, algunos autores proponen metodologías de lógica difusa para manejar la incertidumbre durante el diseño conceptual [52] [80] [81].

#### 2.3.4.1. Matriz de estructura de implementación extendida

En la referencia [82] utiliza un método al que llama Matriz de Estructura de Implementación Extendida (*Extended Implementation Structure Matrix*, eISM). Es similar al MFD pero cambiando las propiedades del producto por funciones requeridas. La ventaja de las propiedades del producto es que pueden medirse, controlarse y asignarles un valor objetivo. En la Figura 16 se muestra la forma que tendría esta estructura de matrices.

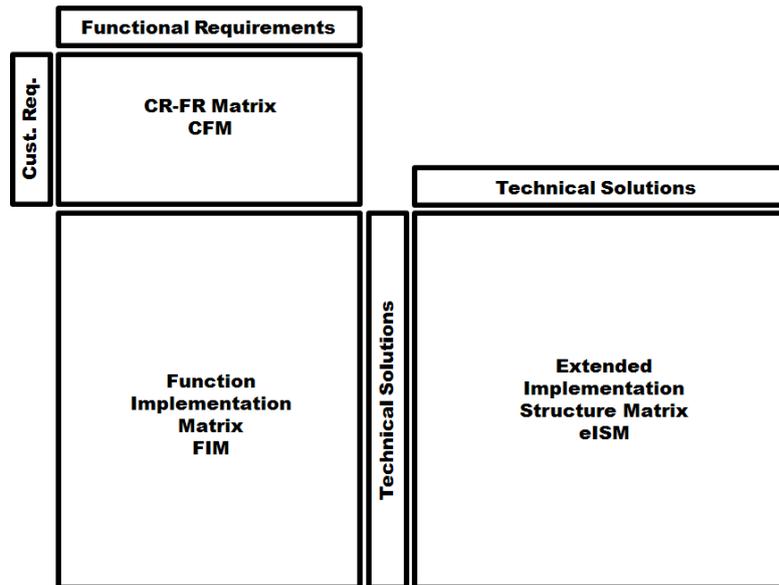


Figura 16. Matrices empleadas en el método eISM

#### 2.3.4.2. Matriz Multidominio

En la referencia [83] los autores proponen una matriz multidominio (*Multi Domain Matrix*, MDM) que conecta los parámetros de diseño con cálculos mecánicos y dibujos principales del generado

En otras palabras, matriz multidominio: MDM permite el análisis de la estructura de un sistema en múltiples dominios, resumiendo cada análisis individual en un DSM que representa múltiples dominios a la vez, como la arquitectura de la organización, la arquitectura del producto o la matriz de la arquitectura del proceso.

Esta matriz tiene el propósito de ayudar a los gerentes, expertos en diseño eléctrico, otros expertos en diseño y cualquier otra persona que no necesite conocimiento sobre el proceso de diseño del generador para rastrear fácilmente los cambios entre parámetros y ver cómo el cambio de algunos parámetros afecta los dibujos y cálculos.

#### 2.3.4.3. Metodología de función integrada

Una debilidad del uso de DSM radica en las limitaciones que tiene en la fase de diseño conceptual, ya que no se puede utilizar para diseñar un producto completamente nuevo. Por ello, en la referencia [84] describen un método que llama Metodología de Función Integrada (*Integrated Function Methodology*, IFM). Esta metodología combina el DSM y una técnica llamada diseño axiomático (*Axiomatic design*, AD) que a través de

un *brainstorming* de técnicos transforma las necesidades los clientes en requisitos funcionales y parámetros de diseño

2.3.4.4. *Tabla de dependencias funcionales*

En la referencia [85] se propone una tabla de dependencias funcionales (*Functional Dependency Table, FDT*) para formar módulos conceptuales. Dichos módulos pueden no tener una realización física al menos dentro de nuestra tecnología o imaginación actual y puede dar lugar a una mayor innovación.

2.3.4.5. *DSM funcional-estratégico*

Este método [58] es un híbrido entre DSM, MFD y Heurística. Desde DSM, toma el formato para describir dependencias. Desde MFD, agrega consideraciones estratégicas, Desde la heurística, agrega flujo de materia, información y energía. Para ello utiliza dos matrices como las de la Figura 17:

- DSM estratégico donde valoran cuatro de las doce razones para modular definidas en el método MFD (Continuidad (Carry Over,CO), Comunalidad (Commonality,C), Ciclo de Vida( Life Cycle,LC), Fabricado o Comprado ( Make or Buy, MB) utilizando una escala de -2 a +2
- DSM funcional donde se valoran la relación de espacio(S), materia (M), información(I) y energía(E) utilizando igualmente una escala de -2 a +2. Por ejemplo, una puntuación de +2 en espacial implicaría que dos soluciones técnicas deben estar adyacentes en el espacio para funcionar; un -2 significaría que absolutamente no pueden

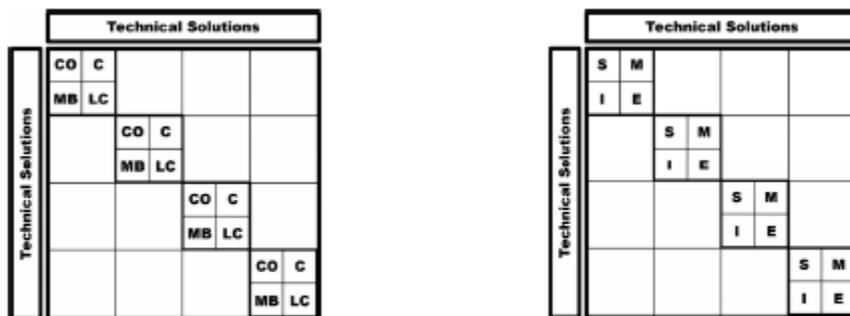


Figura 17. Matriz DSM estratégica (izda) y Matriz DSM funcional(dcha).

#### 2.3.4.6. Enfoque B-FES

En la referencia [44] se propone un método que llamó Estructura funcional basada en el comportamiento (*behavioral-driven function environment structure, B-FES*). Esta metodología incluye una serie de preguntas para ayudar a razonar el comportamiento del sistema modular y que cumpla la función o funciones para lo que fue diseñada [46].

#### 2.3.5. Comparaciones entre métodos

Es habitual que dependiendo del método utilizado, aunque se introduzcan los mismos datos, se obtengan arquitecturas modulares distintas [86].

Para poder comparar distintos métodos es necesario evaluar la idoneidad de la solución propuesta. No existe un estándar para evaluar la modularidad, en la referencia [87] se mencionan las opciones por las que optan algunos autores. Entre ellos, algunos miden la modularidad identificando el número de interacciones entre componentes [88], otros miden la modularidad en función de su conectividad interna [33], otros se centran en el ciclo de vida y cuentan el número de módulos comunes dentro de una familia de productos [46] o midiendo la longitud mínima de descripción (MDL) que se refiere a la asignación de elementos a un grupo[69].

En algunos artículos se puede encontrar varias comparaciones entre distintos métodos[86] [89]. Entre los métodos más comparados destacan: La matriz DSM [56], La matriz MFD [44], y el método de descomposición heurístico[90]

En [86] obtienen las siguientes conclusiones:

- MFD es el más adecuado para definir variantes de diseño y decidir sobre decisiones estratégicas.
- La técnica DSM es más adecuada para modularizar un sistema complejo donde hay demasiadas interacciones para que una persona las maneje.
- Para modularizar una familia de productos, se encontró que el enfoque heurístico de la estructura funcional era el más razonable.
- También encontraron que la técnica DSM era la más repetible y que podía convertirse en un algoritmo computarizado.

## 2.4. Definición de interfaces en arquitectura modular.

Como se ha visto en los anteriores subcapítulos, las interfaces son enlaces compartidos entre componentes, módulos y subsistemas de una arquitectura de producto dada [91].

La estandarización de interfaces permite la intercambiabilidad entre diferentes módulos. De esta manera nuevas variantes pueden ser implementadas fácilmente. Por ello, las interfaces deben de ser diseñadas cuidadosamente para que no se queden obsoletas. Es deseable que puedan ser utilizadas no solo con los módulos diseñados de hoy en día, si no con los que se pueden llegar a desarrollar.

Cuanto menos específicas sean las interacciones entre los distintos módulos más fácil será la adopción de un interfaz estándar. Por otro lado, la estandarización del interfaz limita las formas en que los módulos interactúan a unas pocas alternativas [18].

Los requerimientos para el diseño de un interfaz vienen definidos por: la estructura modular, la variedad de módulos y las reglas de configuración. Es importante tener en cuenta tanto los requerimientos físicos del producto como las restricciones desde el punto de vista de la producción [92].

Existen diferentes clasificaciones de interfaces. En la Tabla 6 se muestra la clasificación realizada en [93]

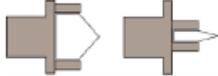
Tipo	Representación esquemática
<b>Adaptable:</b> la interfaz puede ajustarse para conectar diferentes módulos	
<b>Único:</b> mismo tipo de interfaz entre módulos	
<b>Múltiple:</b> Diferentes tipos de interfaces son utilizados en la conexión de módulos	

Tabla 6. Clasificación tipos interfaces [93].

Las interfaces también pueden ser clasificadas según sus especificaciones técnicas en mecánicas, eléctricas, interfaces de software... [94]. Por ejemplo, en lo que se refiere a las interfaces mecánicas se suelen utilizar elementos conectores como planos, fijadores

y pasadores para realizar las conexiones físicas entre los componentes de un producto [94].

Por otro lado, algunas investigaciones proponen el desarrollo de interfaces abiertas (*open interfaces*). En comparación con la interfaz tradicional (es decir, la interfaz cerrada), en la que todas las especificaciones de los módulos adicionales se definen en los procesos de diseño del producto y no se pueden cambiar en la operación del producto, la interfaz abierta se puede utilizar para conectar módulos indefinidos / desconocidos proporcionado por terceros [95]. Los productos con interfaces abiertas pueden soportar mejor la diversidad, adaptabilidad, sostenibilidad y flexibilidad del producto [96]. La interfaz abierta puede admitir la personalización del producto y la innovación abierta del producto [97].

Un ejemplo de interfaz tradicional es la interfaz de automóvil para conectar el motor ya que solo los motores predefinidos pueden conectarse a la plataforma del automóvil a través de la interfaz. Por otro lado, un ejemplo de interfaz abierta es la interfaz de una excavadora para conectar la herramienta frontal es una interfaz abierta, ya que diferentes herramientas (por ejemplo, martillo, excavadora, cucharón, etc.) de varios fabricantes pueden conectarse a la excavadora a través de la interfaz [95].

En la Tabla 7 se muestra una comparación entre las interfaces tradicionales y las abiertas [95].

	Interfaz tradicional	Interfaz abierta
<b>Definición</b>	Interfaz utilizada para conectar los módulos especificados en el proceso de diseño.	Interfaz utilizada para conectar la plataforma con módulos desconocidos que pueden proporcionar los proveedores externos.
	Un ejemplo: la interfaz del automóvil con el motor	Un ejemplo: la interfaz de una excavadora para conectar dispositivos de ejecución frontal
<b>Característica</b>	Cerrado; no facilita el montaje y desmontaje por el usuario	Abierta; Fácil montaje y desmontaje para el usuario
	Falta de adaptabilidad; falta de estandarización	Adaptabilidad; Estandarización
<b>Implicación</b>	Innovaciones cerradas tanto para producto como para tecnología.	Posibles innovaciones abiertas tanto para producto como para tecnología
	Modelo de negocio cerrado; falta de personalización del producto	Modelo de negocio abierto; funciones personalizadas

<b>Pros</b>	Fácil de predecir la influencia de los módulos adicionales en el rendimiento del producto	Mayor variedad de productos y flexibilidad.
	Fácil de controlar la calidad y fiabilidad del producto.	Mejor adaptabilidad, sostenibilidad, capacidad de actualización y extensibilidad.
<b>Contras</b>	Falta de variedad y flexibilidad del producto.	Difícil de predecir la influencia de los módulos adicionales en el rendimiento del producto
	Falta de adaptabilidad, sostenibilidad, capacidad de actualización y extensibilidad.	Difícil de controlar la calidad y fiabilidad del producto.

Tabla 7. Comparación entre interfaces tradicionales y abiertas [95].

En la referencia [95] se propone un método para el diseño y la mejora de una interfaz abierta. En Figura 18 se muestra el flujograma del método propuesto.

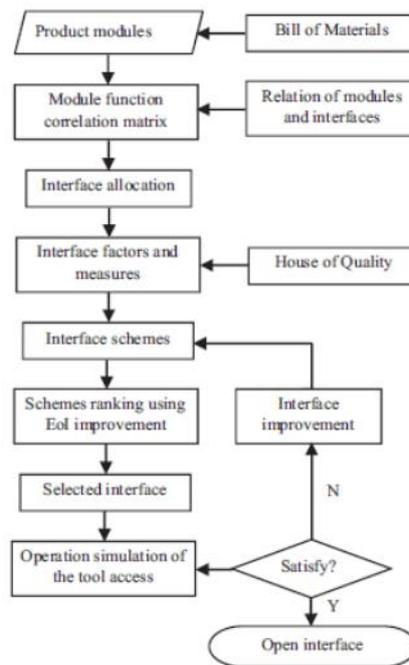


Figura 18: Diagrama de flujo para el diseño de una interfaz abierta.

En dicho método usan una matriz que relaciona los módulos funcionalmente de tal manera que puedan identificar las conexiones entre los módulos. Para diseñar cada interfaz, utilizan un método iterativo en que establecen un criterio que se basa en factores geométricos y operativos para medir la idoneidad del diseño del interfaz [95].

## 2.5. Métodos Multiobjetivo

Los métodos multiobjetivo para toma de decisiones (*Multi Criteria Decision Making* (MCDM)) son algoritmos matemáticos, de la que existen infinidad de métodos, muchos de ellos aplicados en programas informáticos de toma de decisiones o *Decision support systems* (DSS). Con esta metodología se puede seleccionar que solución es la óptima entre varias propuestas teniendo en cuenta diferentes criterios u objetivos. Aunque en el presente trabajo no se entrará describirán en profundidad, debido a su importancia en la toma de decisiones entre distintos diseños o parámetros de diseño, a continuación, se describen brevemente algunos de los mencionados en la bibliografía estudiada en este trabajo:

- TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*)

TOPSIS fue desarrollado por Hwang & Yoon y su principal atractivo es que la única entrada subjetiva que se necesita son las ponderaciones a cada criterio. De acuerdo con esta técnica, la mejor alternativa sería la más cercana a la solución ideal positiva y la más lejana a la solución ideal negativa. La solución ideal positiva es una solución que maximiza el criterio de beneficio y minimiza el criterio de coste. Usando el método TOPSIS, las diferentes soluciones de diseño son valoradas.

El método es fácilmente implementable en una hoja de cálculo. Los datos requeridos serán[6]:

- (i) Atributos ponderados (se basarán en los objetivos y necesidades de la compañía)
- (ii) Puntuaciones para cada diseño en relación con los atributos seleccionados.

Obviamente, un análisis de sensibilidad de los resultados es recomendable debido a la dependencia con las puntuaciones y ponderaciones asignadas durante la evaluación. Esto no limita la aplicabilidad pero si que encomienda establecer las ponderaciones basado en objetivos concretos e implementar el análisis de sensibilidad para investigar la influencia de cada atributo [6].

- Modelo de programación de enteros (IP, *Integer programming*)

Considera las necesidades del cliente, funciones, módulos de fabricación y la representación jerárquica del sistema. Un algoritmo de recocido simulado (*Simulated*

*annealing* (SA)) es empleado para encontrar la mejor solución [98]. También se puede aplicar IP para optimizar simultáneamente tanto los módulos atributo y como las combinaciones de módulos [99].

- Programación por metas (*Goal Programming* (GP))

Se utiliza para solventar problemas lineales en los que existen varios objetivos a cumplir, normalmente en conflicto. Para solventar este problema se utilizan metas para cada objetivo. La solución que se obtendrá de este problema será cuando se minimizar la suma de las desviaciones de cada objetivo con su meta correspondiente. Este método es aplicable en la fase de diseño preliminar [100].

El uso de estos métodos o modificaciones de ellos están ampliamente extendido y es fácil encontrar en internet hojas de cálculo con ellos ya implementados para adaptarlos fácilmente a tu problema. Por ejemplo, en la Figura 19 se muestra un ejemplo de una hoja de cálculo descargada desde internet [101] con el método TOPSIS implementado.

Solving MCDM problem using TOPSIS Method									
	Non Benf.	Benf.	Benf.	Benf.					
weightage	0,35	0,25	0,25	0,15					
	Price/cost	Storage Space	Camera	Looks					
Mobile 1	250	16	12	5					
Mobile 2	200	16	8	3					
Mobile 3	300	32	16	4					
Mobile 4	275	32	8	4					
Mobile 5	225	16	16	2					
	Price/cost	Storage Space	Camera	Looks					
Mobile 1	0,44280744	0,301511	0,42857	0,5976					
Mobile 2	0,35424595	0,301511	0,28571	0,3586					
Mobile 3	0,53136893	0,603023	0,57143	0,4781					
Mobile 4	0,48708819	0,603023	0,28571	0,4781					
Mobile 5	0,3985267	0,301511	0,57143	0,239					
	Price/cost	Storage Space	Camera	Looks	Si+	Si-	Pi	Rank	
Mobile 1	0,1549826	0,075378	0,10714	0,0896	0,089	0,0716	0,4459	4	
Mobile 2	0,12398608	0,075378	0,07143	0,0538	0,1099	0,0645	0,37	5	
Mobile 3	0,18597913	0,150756	0,14286	0,0717	0,0645	0,1099	0,63	1	
Mobile 4	0,17048087	0,150756	0,07143	0,0717	0,0871	0,0849	0,4936	2	
Mobile 5	0,13948434	0,075378	0,14286	0,0359	0,0939	0,0852	0,4758	3	
V+	0,12398608	0,150756	0,14286	0,0896					
V-	0,18597913	0,075378	0,07143	0,0359					

**Step-1 Calculate Normalised Matrix**

$$\bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}}$$

**Step-2 Calculate weighted Normalised Matrix**

$$V_{ij} = \bar{X}_{ij} \times W_j$$

**Step-3 Calculate the ideal best and ideal worst value**

**Step-4 Calculate the Euclidean distance from the ideal best**

$$S_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2 \right]^{0.5}$$

**Step-5 Calculate the Euclidean distance from the ideal worst**

$$S_i^- = \left[ \sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0.5}$$

**Step-6 Calculate Performance Score**

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

Figura 19: Ejemplo de implementación de método multiobjetivo en hoja de cálculo.

## 2.6. Proceso de diseño de una arquitectura modular

Como se ha visto en el subcapítulo 2.3 existen distintos métodos para descomponer un producto en módulos. Pero estos métodos hace falta enmarcarlos dentro de un proceso de diseño completo. Agregando distintos pasos que sugieren distintas fuentes [2] [93] se forma un proceso que estaría compuesto por las siguientes fases:

1. Introducción del producto deseado y los objetivos que se pretenden conseguir con una arquitectura modular: Se analizará el posible potencial tanto externo como interno de una arquitectura modular. Para ello se puede analizar el mercado para establecer los requerimientos del producto por parte del futuro cliente y el objetivo que se conseguirá con un diseño modular.
2. Definición de especificaciones necesarias del producto: Se tendrá que definir las características necesarias del producto. Estas características serán tanto requerimientos del cliente como posibles limitaciones que deban cumplir. Es deseable que algunas de estas especificaciones puedan ser estandarizadas.
3. Identificación y aplicación de la metodología de modularidad más adecuada dependiendo de las características del producto. Para la mayoría de las metodologías es conveniente una descomposición funcional del producto y una definición de componentes e interfaces entre ellos. Por tanto, se debe obtener en esta fase una definición de la arquitectura modular de acuerdo con los requerimientos y limitaciones definidas previamente. Siempre siendo deseable un diseño estandarizado tanto de módulos como de interfaces.
4. Estudio de soluciones técnicas: en ciertos productos, existe un cierto estado del arte. Conviene realizar un estudio sobre que soluciones técnicas han sido aplicadas hasta el momento, procurando incorporar los aspectos positivos de cada una de ellas en el modelo de estructura modular que se pretende alcanzar.
5. Diseño del producto modular: Una vez que se tenga un esquema conceptual de la arquitectura modular del producto y habiendo estudiado distintas soluciones, podrá empezar el diseño del producto. Se pueden aplicar otras metodologías de diseño como DFMA (Diseño para la fabricación y el ensamblaje).

6. Evaluación del diseño: Es necesario analizar el producto diseñado para comprobar que cumpla con los requisitos y limitaciones establecidas. Si no fuera sería necesario un rediseño o un cambio la estructura modular definida.

### 3. CASO DE ESTUDIO: PAQUETE DE BATERÍAS MODULAR PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

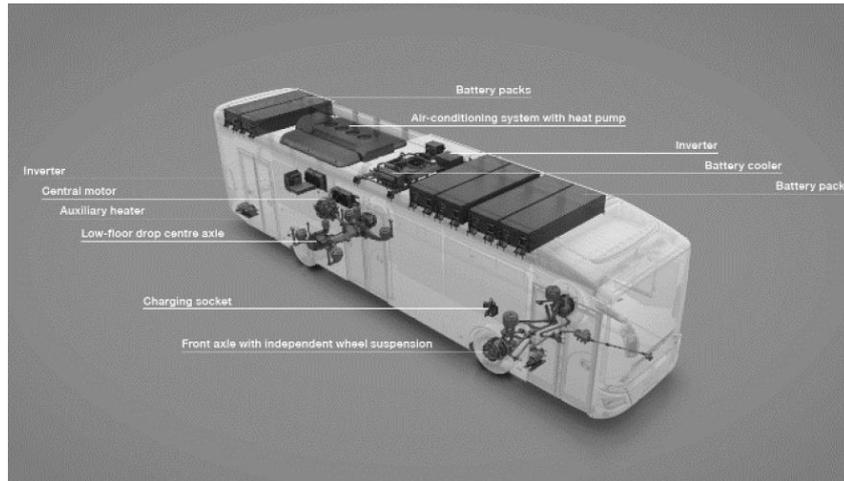
Una vez que se ha hecho un repaso al estado del arte del diseño modular, en este capítulo se aplicarán algunos de estos conocimientos en el diseño de un paquete de baterías para un vehículo eléctrico. Para ello, se seguirá el proceso indicado en el subcapítulo 2.6.

#### 3.1. Introducción del producto y objetivos que se pretenden conseguir

En los últimos años, debido a la conciencia que se está obteniendo para frenar el cambio climático, se están desarrollando múltiples soluciones para reducir la cantidad de gases contaminantes que se emiten a la atmósfera. La movilidad es un campo en el que se está prestando especial atención. Una de las soluciones por las que se está optando es la introducción el mercado de vehículos eléctricos que vayan sustituyendo gradualmente los vehículos de combustión. Es de especial importancia en las urbes, donde los altos índices de contaminación han tenido efectos perjudiciales en la salud de los habitantes. Los vehículos eléctricos están evolucionando al mismo ritmo que su sistema de almacenamiento de energía, la mayor parte baterías.

Desde IKERLAN, se lleva tiempo estudiando y desarrollando soluciones relacionadas con el almacenamiento de energía. Como es fácilmente entendible, la mayor parte de los proyectos bibliográficos que se pueden encontrar se centran en el desarrollo de paquetes de baterías para coches. Por ello, desde IKERLAN, se cree que es más fácil entrar en el mercado desarrollando soluciones de almacenamiento para autobuses.

Este proyecto tiene como objetivo aplicar técnicas de modularidad en el diseño de un paquete de baterías enfocado a una aplicación de autobús eléctrico. En la Figura 20, se muestra una imagen de un autobús con un sistema modular de almacenamiento.



*Figura 20. Autobús con paquete de baterías modulares[102].*

### 3.1.1. Ventajas del uso de una arquitectura modular.

El uso de una arquitectura modular para el diseño del paquete de baterías de un vehículo eléctrico está ampliamente extendido. Las ventajas de una arquitectura modular ya se explicaron en el apartado 2.2.2. Algunas de estas ventajas especificadas para esta aplicación son:

- La modularidad permite escalar el paquete de baterías para cumplir con los requisitos necesarios de energía y de potencia para cada vehículo, sin necesidad de grandes modificaciones estructurales.
- Gracias a poder utilizar el mismo tipo de celdas en distintos modelos, se reducen los costes de fabricación.
- Posibilidad de utilizar diferentes tipos de celdas. Una misma arquitectura de paquete puede utilizar módulos con distintos tipos de celdas.
- Una arquitectura modular permite adaptarse con un menor coste y una mayor rapidez a la continua evolución de las celdas.

Algunos fabricantes como el grupo Volkswagen [103] utilizan un paquete de baterías modular como el de la Figura 21.

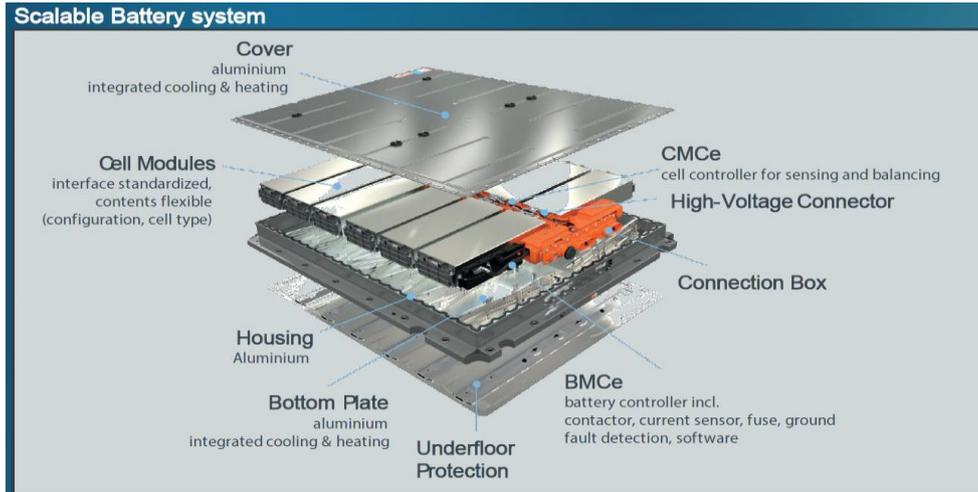


Figura 21. Ejemplo de paquete de baterías del grupo Volkswagen [103].

Este paquete de baterías es escalable de tal manera que pueden adaptarlo a diferentes requerimientos como puede ser la autonomía. En la Figura 22 se muestra la plataforma con 7, 9 y 12 módulos pudiendo aumentar la autonomía a 330, 420 y 550 km respectivamente. Con este diseño van a poder diversificar la gama de vehículos utilizando la misma plataforma

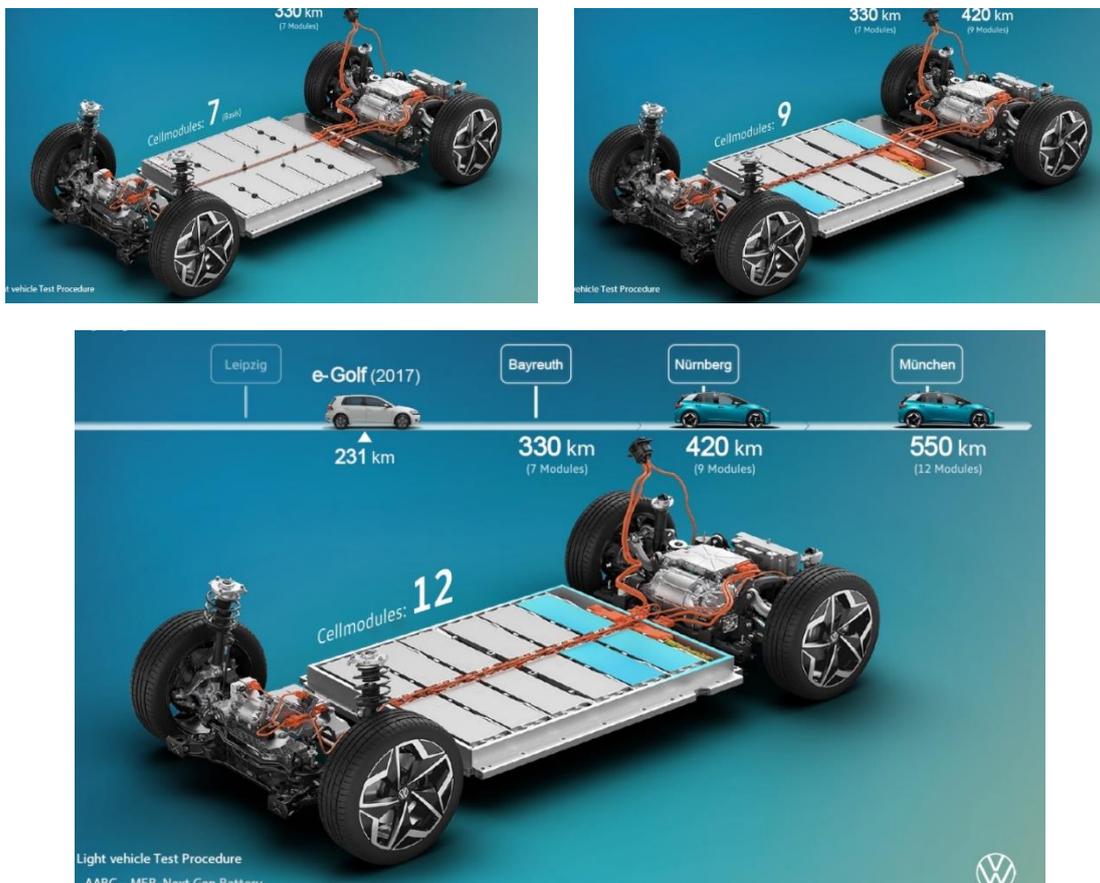


Figura 22. Ejemplo de plataforma de paquete de baterías del grupo Volkswagen[103].

### 3.2. Requisitos necesarios y limitaciones del producto

El diseño de un paquete de baterías es un proceso muy complejo. Como se muestra en la Figura 23, los requisitos de las baterías de un vehículo eléctrico son muy diversos: Coste, eficiencia, seguridad, experiencia de conducción, requerimientos, fabricación, mantenimiento...[104]

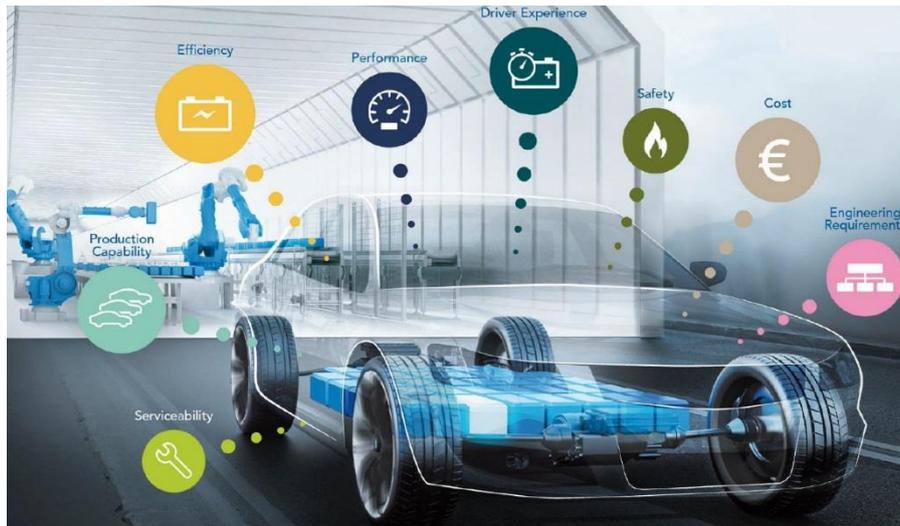


Figura 23. Requisitos de un paquete de baterías para un vehículo eléctrico [104].

Unos de los requerimientos habituales de un vehículo eléctrico es la autonomía. La autonomía está relacionada principalmente con el peso y la capacidad de las baterías. Por tanto, de la elección de la tecnología de las baterías dependerá en gran medida su autonomía. El peso de los materiales utilizados para el diseño del paquete obviamente debe ser reducido lo máximo posible para que no disminuya demasiado la autonomía del vehículo. La cantidad de capacidad/autonomía que se requiere al vehículo puede variar en función de la aplicación. Esto implica que la deseada estandarización de un paquete de baterías debe tener en cuenta los distintos escenarios de autonomía.

Desde el punto de vista de la fabricación y el mantenimiento es deseable que sea accesible y fácilmente montable y desmontable.

El resto de los requerimientos del paquete de la batería como el coste, la eficiencia, la vida o la potencia dependen de la tecnología utilizada. La tecnología preferida para el sistema de almacenamiento en vehículos eléctricos son las baterías de ion de litio. Esto

es debido a su gran densidad de energía, alta tensión, baja tasa de autodescarga, larga vida cíclica, altas tasas de carga y descarga[105].

Sin embargo, las baterías de ion de litio tienen ciertas limitaciones puesto que son altamente sensibles a la temperatura ambiente, la presión y a las cargas mecánicas dinámicas a las que se puedan ver sometidas en un vehículo eléctrico (EV). La eficiencia, la vida cíclica y la seguridad son los principales aspectos que se ven afectados por las condiciones de trabajo de la batería [106] [107]. Existen tres principales peligros que un buen diseño de un paquete de baterías debe evitar: el embalamiento térmico (*thermal runaway*), las vibraciones o los impactos en el vehículo[108].

### 3.2.1. Aislamiento a las vibraciones

En el momento en que un vehículo entra en carretera, una vibración vertical de baja frecuencia es percibida. Además, viajar sobre superficies irregulares, como baches, produce choques que causan vibraciones verticales. Durante el arranque y la parada o retrocediendo el vehículo en un estacionamiento se producen choques longitudinales.

Las vibraciones pueden producir cargas mecánicas dinámicas en los subsistemas eléctricos como conectores de terminales y barras colectoras en una batería, que conllevan pérdidas de continuidad eléctrica y fallos por fatiga en la carcasa. Algunos efectos de estos fallos son: pérdida de capacidad de los paquetes de baterías [109] y una delaminación entre las capas que forman la celda cuando la batería entra en resonancia disminuyendo la vida útil de la batería [110].

Por tanto, el diseño debe tratar de evitar las vibraciones en el paquete de baterías, o al menos, frecuencias típicas del vehículo como las del sistema de suspensión (0 a 7 Hz), el tren motriz del vehículo (7 Hz a 20 Hz) y el chasis del vehículo (20 Hz a 40 Hz) [109, 111]

### 3.2.2. Embalamiento térmico

El embalamiento térmico es el comienzo de una reacción exotérmica en cadena donde las celdas de la batería comienzan a autocalentarse a una velocidad mayor que  $0,2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{min}$  [112]. El embalamiento térmico generalmente emite una gran cantidad de gas formado por vapores de hidrocarburos, chorros de efluentes de material y suficiente calor para destruir materiales próximos a ella y en algunos casos producirse una combustión

espontánea de los componentes químicos que forman la batería [113]. Algunos ejemplos de EV destruidos por esto se muestran en la Figura 24:



*Figura 24. Ejemplos de los peligros del embalamiento térmico en vehículos eléctricos[114].*

No obstante, el riesgo de daños al vehículo o los pasajeros solo existe en el caso de que los gases calientes escapen los límites de la batería [108].

Las causas de un embalamiento térmico pueden ser: un corto circuito dentro de la celda, un abuso físico, defectos de fabricación o exposición de la celda de la batería a temperaturas externas extremas [112]

Para minimizar este riesgo existen varias medidas que se pueden incluir en el diseño como:

- Incluir en el paquete un punto que falle a una presión no peligrosa predeterminada, para que de esta manera se evite que la presión se eleve hasta el que sea un riesgo importante [108].
- Controlar el lugar o los lugares donde los humos calientes y el material efluente que se produce en un embalamiento térmico son liberados [108].
- Controlar las interacciones térmicas entre regiones de la batería, evitando así la propagación de un solo evento de embalamiento térmico a todo el paquete [108].

### 3.2.3. Resistencia al impacto

En un diseño usual en el que el paquete de baterías se encuentre en el centro del vehículo, el propio vehículo absorbería el impacto en caso de accidente no llegando a afectar en ningún caso al paquete de baterías.

### 3.2.4. Normativa / Patentes

Para estas limitaciones que son necesarias considerar existen algunos estándares, como los que se muestran en la Tabla 8, que proponen asociaciones como SAE (Society of Automotive Engineers). Estos estándares sirven de guía más que de obligación, pero son prácticas recomendables.

Estándar	Título	Descripción
SAE J1766	Práctica recomendada para EV& HEVs test de sistemas de choque integrado	Métodos específicos de test y criterios de comportamiento que evalúan el derrame, retención y batería aislamiento eléctrico durante pruebas de choque especificadas
SAE J1797	Pack de módulos de batería para vehículos eléctricos	Proporciona diseños de batería comunes a través de la descripción de dimensiones, terminación, retención, sistema de ventilación y otras características requeridas en una aplicación EV
SAE J2289	Sistema de paquete de baterías de accionamiento eléctrico: pautas funcionales	Describe las prácticas para el diseño de sistemas de baterías para vehículos que utilizan una batería recargable para proporcionar o recuperar energía de tracción.
SAE J2344	Pautas técnicas para la seguridad del vehículo eléctrico	Define información de pautas de seguridad que debe considerarse al diseñar vehículos eléctricos para uso en vías públicas
SAE J2380	Prueba de vibración de baterías de vehículos eléctricos	Describe las pruebas de durabilidad de vibración de un módulo de batería EV o paquete de batería

SAE J2929	Sistema de baterías de propulsión para vehículos eléctricos e híbridos Estándar de seguridad	Criterios de rendimiento de seguridad para sistemas de baterías considerados para un uso en la propulsión de un vehículo conectadas galvánicamente a un tren de fuerza de alto voltaje
-----------	---	--

Tabla 8. Estándares SAE relacionados con el diseño de un paquete de baterías para un vehículo eléctrico

Además, también puede ser de utilidad consultar las patentes registradas que proponen soluciones para las limitaciones de vibraciones, embalamiento térmico o resistencia al impacto. En la Tabla 9 se muestran las patentes registradas en EE. UU asociadas a estos problemas.

Limitación	EE.UU. Patente	Empresa	Fecha
<b>Embalamiento térmico</b>	8663824	Tesla Motors	04/04/2014
	8361642	Tesla Motors	29/01/2013
	8574732	Tesla Motors	05/11/2013
	8709644	Ford	29/04/2014
	8679662	Ford	25/05/2014
	8268469	Tesla Motors	18/03/2012
	8057554	BYD	28/05/2009
	8481191	Tesla Motors	09/07/2013
	8557416	Tesla Motors	15/10/2013
	8642204	Nissan	04/02/2014
<b>Aislamiento de vibraciones</b>	7507499	General Motors	24/03/2009
	4169191	General Motors	25/09/1979
	8268479	BYD	18/07/2012,
	7556656	Nissan	07/07/2009
	7110867	Nissan – Renault	19/09/2006
	8304103	Nissan	06/11/2012
	8124276	Nissan	28/02/2012
	8580427	Mitsubishi	05/04/2012
8733492	Suzuki Motor	27/05/2014	
<b>Resistencia al impacto</b>	8702161	Tesla Motors	22/04/2014
	8696051	Tesla Motors	15/04/2014
	8424960	Tesla Motors	23/04/2013
	8393427	Tesla Motors	12/03/2013
	8286743	Tesla Motors	16/10/2012
	8733488	Mitsubishi	27/05/2014
	8276697	Mitsubishi	02/10/2012
	8012620	Mitsubishi	06/09/2011
8037960	Toyota	18/10/2011	

	7921951	Toyota	12/04/2011
	7717207	Toyota	18/10/2010
	2013155106 A1	Toyota	17/10/2013
	20130248267	Suzuki Motor	26/09/2013
	7070015	Ford	04/04/2006
	6676200	Ford	13/01/2004
	0139527	Renault	16/06/2011

Tabla 9: Patentes EEUU para solventar las limitaciones de un paquete de baterías.

### 3.3. Identificación y aplicación de la metodología de modularidad más adecuada

El producto que se desea diseñar no es un producto aislado, es decir, no es un producto final. El producto final sería el vehículo eléctrico. El diseño del paquete de baterías forma parte de la aplicación de una metodología modular en un vehículo eléctrico. De la descomposición modular realizada en un vehículo eléctrico, un módulo sería el sistema de almacenamiento. En la Figura 25 se puede ver una descomposición funcional simplificada de un vehículo eléctrico con algunos de los módulos principales que se obtendrían. Un método de los que se explicaron en el subcapítulo 2.3 para definir módulos en un vehículo eléctrico podría ser una matriz de estructura de diseño (DSM). Con él se podría relacionar e incluso ponderar la relación e interacciones entre cada componente.

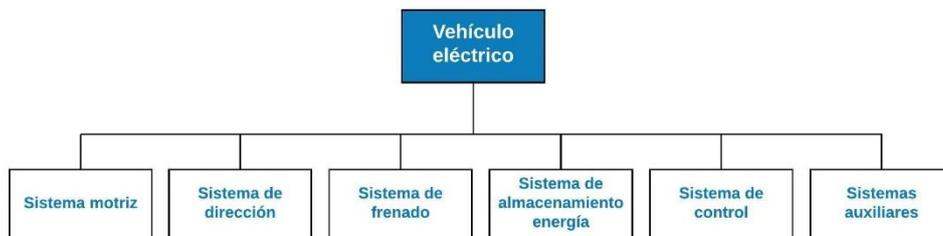


Figura 25: Descomposición simplificada de un vehículo eléctrico

Aunque los vehículos ya aplican varios conceptos de modularidad, como el uso de una plataforma común para varios vehículos todavía puede aplicarse en más medida. Por ejemplo, en los coches, se tiende a aprovechar al máximo el espacio por lo que las baterías están muy integradas en el vehículo. Esto hace que las interfaces, principalmente las mecánicas, sean muy específicas para cada diseño.

Aunque en este trabajo tenga como objetivo el diseño de un paquete de baterías, al tratarse de un módulo dentro del diseño de un vehículo eléctrico, será necesario definir las interfaces entre el paquete de baterías y el vehículo. Una de las ideas de este trabajo es potenciar la estandarización de las interfaces con el vehículo para que distintos paquetes de baterías puedan ser utilizados, esto puede ser más sencillo en autobuses puesto que se puede disponer de un mayor espacio.

Para definir las interfaces exteriores del paquete de baterías con el vehículo se puede utilizar una matriz que indica el tipo de relación (Mecánica, Eléctrica de potencia, Comunicación, Térmica) entre las funciones del vehículo. Esta matriz es similar a la descrita en el subcapítulo 2.3.4.5 a la que en [58] llaman DSM-funcional. Este método utiliza el concepto de dominios del método heurístico y el formato de mostrar los datos de la DSM. En la Tabla 10 se muestra el tipo de interfaz que posteriormente habrá que definir entre el paquete de baterías y otros módulos de un vehículo eléctrico. Se añaden algunos módulos como el sistema motriz o sistema de carga pues, aunque no tengan una interfaz directa con el paquete de baterías, tiene una relación indirecta importante.

	Paquete de baterías	Sistema de control	Sistema motriz	Sistema de carga	Sistemas de transformación energía eléctrica	Sistemas de gestión térmica	Chasis Vehículo
<b>M</b> → Interfaz mecánica							
<b>E</b> → Interfaz eléctrica							
<b>C</b> → Interfaz de comunicaciones							
<b>T</b> → Interfaz térmica							
<b>Paquete de baterías</b>		C			E	T	M
<b>Sistema de control</b>	C		C	C	C, E	T, C	M
<b>Sistema motriz</b>		C			E	T	M
<b>Sistema de carga</b>		C			E		M
<b>Sistemas de transformación energía eléctrica</b>	E	C, E	E	E		T	M
<b>Sistemas de gestión térmica</b>	T	T, C	T		T		M
<b>Chasis Vehículo</b>	M	M	M	M	M	M	

*Tabla 10. Matriz DSM funcional entre módulos vehículo eléctrico para definir interfaces.*

La matriz obtenida es simétrica, y mirando en la fila/columna del paquete de baterías, se puede ver qué tipo de interfaces tiene con cada sistema. En el subcapítulo 3.4 se entrará más en detalle, pero a continuación se indica y describe cuales son:

- Interfaz mecánica con el chasis: Mantiene sujeto al vehículo el paquete de baterías.
- Interfaz de control/comunicaciones con el sistema de control, que se encarga de controlar la potencia entrante y saliente. También es vital para la seguridad del paquete de baterías.
- Interfaz eléctrica con los sistemas de transformación de energía eléctrica. El sistema de transformación de energía eléctrica está compuesto de inversores, rectificadores, transformadores que adecuan la energía eléctrica saliente/entrante de la batería.
- Interfaz térmica con el sistema de gestión térmica. Se encarga de mantener el paquete a una temperatura adecuada.

Puesto que no se trata de muchas relaciones se podría haber realizado un diagrama de bloques como el de la Figura 26 indicando con un color diferente el tipo de flujo entre cada bloque. Este diagrama sería del estilo que propone el método heurístico de estructura funcional [51] que se describió en el subcapítulo 2.3.1. Como se puede observar, es mucho más confuso y difícil de interpretar que el método matricial que con un vistazo a la fila de cada módulo sabías que tipo de interfaz tenía con los otros módulos.

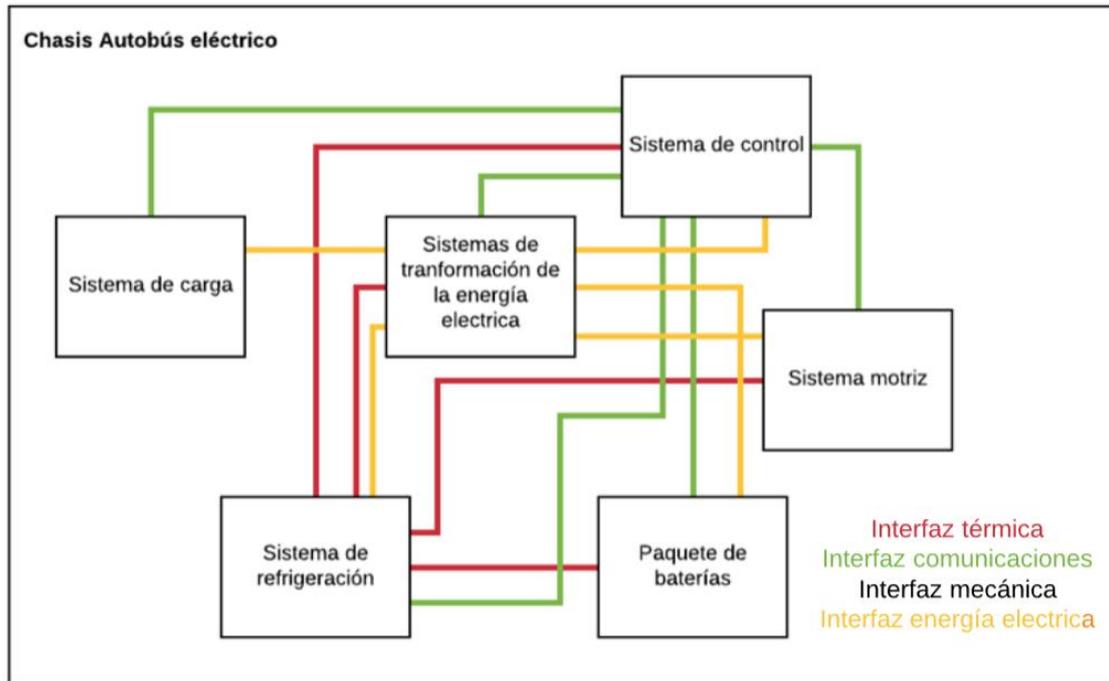


Figura 26: Diagrama de bloques con interfaces en un vehículo eléctrico.

En lo que se refiere al paquete de baterías de un vehículo eléctrico se suele dividir en tres niveles celda, módulo y paquete[115]. En la Figura 27 se muestra esta división. En el próximo subcapítulo se realizará un estudio sobre que soluciones técnicas se están empleando actualmente. En él se entrará más en detalle en cada nivel, y finalmente se hará un esquema conceptual más detallado.

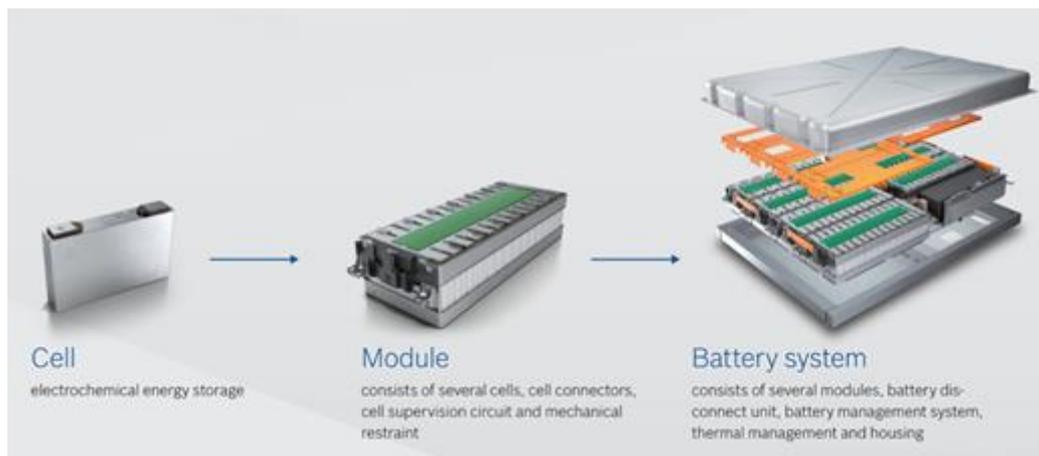


Figura 27. Los tres niveles de división de un paquete de baterías.

### 3.4. Estudio soluciones técnicas

En el diseño de paquete de baterías se lleva mucho tiempo trabajando por lo que existe cierto consenso sobre sus componentes. En este capítulo se realizará un estado del arte sobre que soluciones técnicas han sido adoptadas hasta ahora tanto para interfaces como para cada nivel de descomposición del paquete de baterías.

#### 3.4.1. Celda de ion de litio

La celda es una unidad electroquímica con una tensión determinada por su química [115]. La elección de la celda ideal para cada aplicación es posiblemente, la decisión más difícil en el diseño de un producto. Además, el desarrollo de celdas de ion de litio está en una evolución constante mejorando sus características año tras año como se puede ver en la Figura 28 [116]. Existen diferentes tecnologías y formatos de celdas.

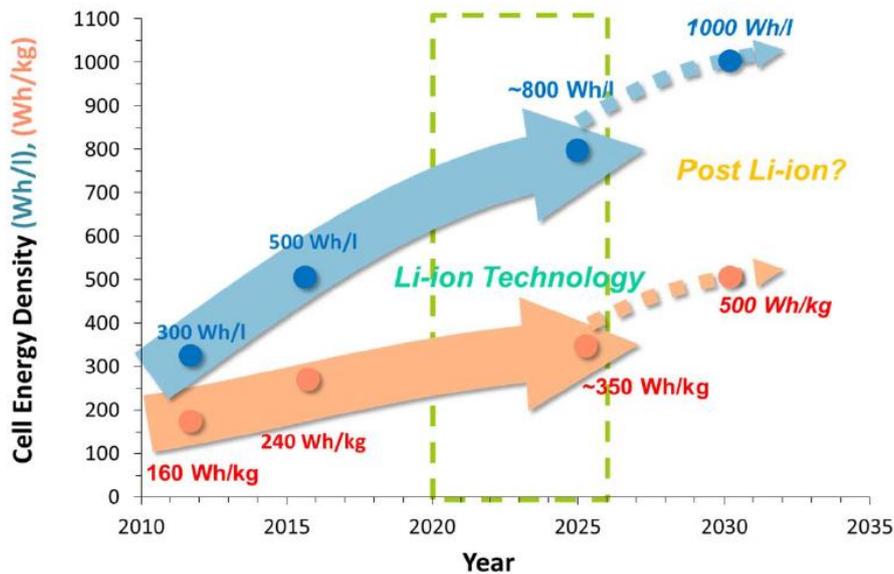


Figura 28. Evolución de la densidad de energía de las celdas en los últimos años [116].

Cada tecnología de celdas de ion de litio tiene distintas propiedades y son nombradas en función del material de su cátodo. Por ejemplo: Litio-Cobalto (LiCoO<sub>2</sub>), Litio-Manganeso (LiMnO<sub>4</sub>), Níquel-Manganeso-Cobalto (NMC) o Litio-Hierro-Fosfato (LiFePO<sub>4</sub>) [105]. En la Tabla 11 se comparan algunas de sus características [117].

Característica	LCO	LMO	NMC	LFP
Cátodo	LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiNi <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>

<b>Ánodo</b>	Grafito	Grafito	Grafito	Grafito
<b>Tensión nominal)</b>	3,8 V	3,95 V	3,7 V	3,25 V
<b>Energía específica</b>	150-200 Wh/kg	100-150 Wh/kg	100-240 Wh/kg	60-165 Wh/kg
<b>Densidad de energía</b>	400-640 Wh/L	250-350 Wh/L	250-640 Wh/L	125-250 Wh/L
<b>Vida cíclica</b>	>500	>500	>500	>1000
<b>Seguridad</b>	Baja	Media	Media	Alta
<b>Rendimiento</b>	Medio	Bajo	Medio	Medio
<b>Coste</b>	Bajo	Medio-Bajo	Medio	Medio
<b>Aplicación principal</b>	Dispositivos portátiles	Herramientas eléctricas, equipos médicos	Vehículos eléctricos	Aquella que requiera alta potencia/seguridad

Tabla 11. Comparación de características de diferentes tecnologías ion litio.

Por otro lado, se puede elegir entre diferentes formatos de celdas: cilíndrica (con el material activo enrollado en forma de espiral), prismática (con el material activo enrollado en forma elíptica) y cartucho (con láminas de material activo). En la Tabla 12 se muestran los distintos formatos [105].

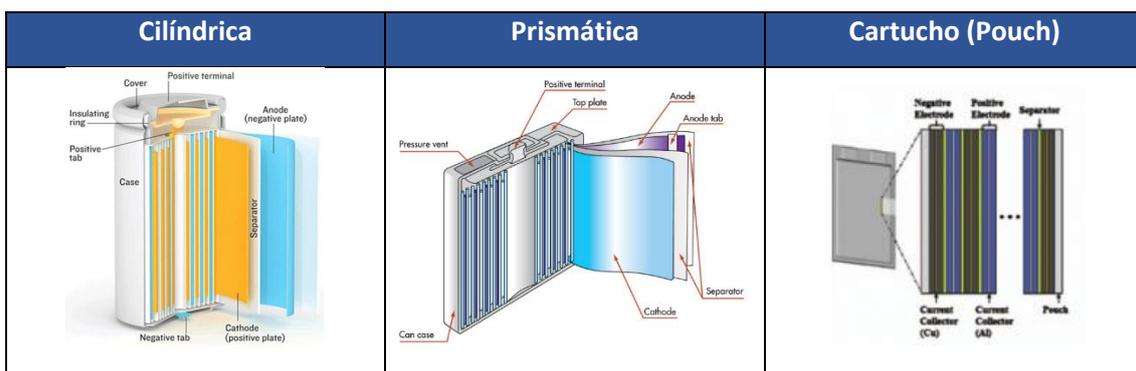


Tabla 12. Distintos formatos de celda

De estas tecnologías y formatos mencionados de celdas de ion de litio, existen cierta variedad de uso en el mercado del automóvil. En la Tabla 13 se muestran celdas usadas en paquete de baterías de vehículos [118].

Tecnología de ion de litio	Energía específica de la celda (Wh/kg)	Energía específica del paquete (Wh/kg)	Formato de celda	Fabricante-Vehículo
LTO-NMC	89	57.5	Prismática	Toshiba-Honda Fit
LFP	131	83.9	Cartucho(Pouch)	A123-Chevy Spark
NMC	129	88.2	Prismática	Samsung-Fiat500e
NCA	272	149.3	Cilíndrica 18650	Panasonic- Tesla Model S/X
NMC	244	151.9	Cartucho(Pouch)	LG Chen-Renault Zoe

Tabla 13: Ejemplos de celdas en distintos vehículos.

### 3.4.2. Módulo de baterías

El módulo es un conjunto de celdas conectadas en serie, en paralelo o en una configuración mixta que proporcionara la potencia necesaria al motor y a los sistemas auxiliares. Cada módulo de baterías tiene su propio sistema de monitorización, sensores, conexiones eléctricos y térmicos que son empaquetados juntos [115]. En la Figura 29 se muestran algunos ejemplos de módulos[119, 120]

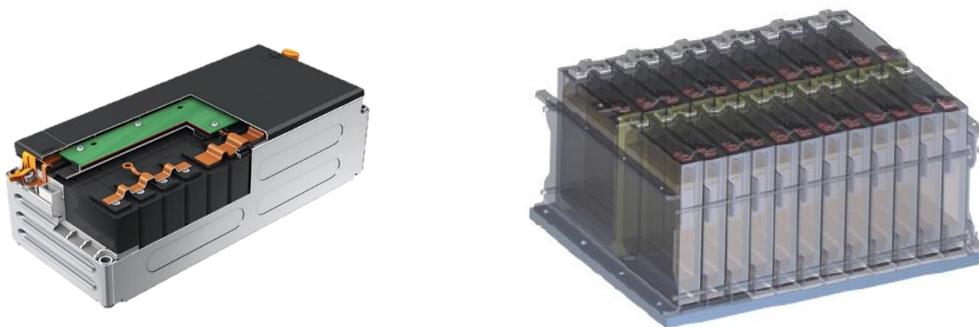
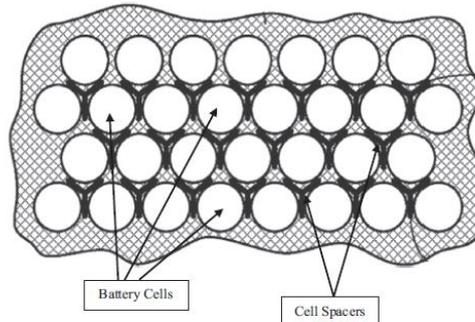


Figura 29. Ejemplos de algunos diseños de módulos de baterías.

Para evitar el embalamiento térmico, se suele utilizar un separador entre celdas que son configurados para asegurarse de que cada celda de la batería permanece en su ubicación inicial. El movimiento de la celda puede modificar el proceso de transferencia

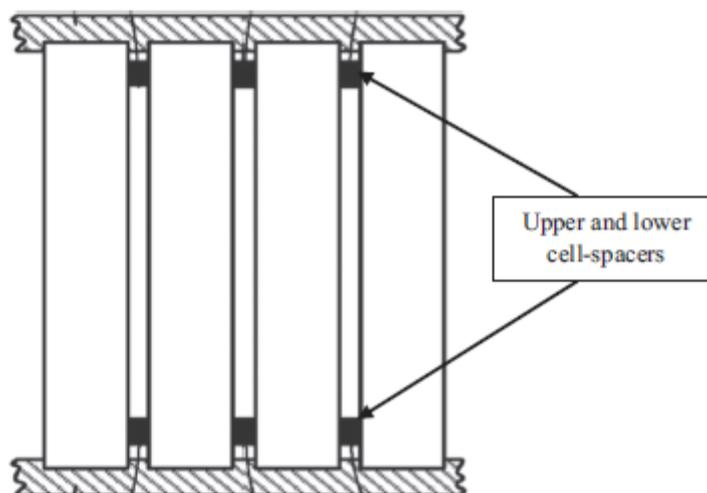
de calor entre las dos celdas que cambiaría de radiación y convección a una combinación de radiación, convección y térmica [108].

La patente de EE. UU. 8481191 proporciona un diseño de separadores para usar con celdas cilíndricas como se ve en la Figura 30 [121].



*Figura 30. Ejemplo de separadores de celdas cilíndricas [121].*

Para ahorrar masa y lograr una mayor energía específica (Wh/kg) del paquete de baterías se puede utilizar espaciadores como se muestra en la Figura 31. Se trata de utilizar dos espaciadores más pequeños, en la parte superior e inferior, en vez de un espaciador largo que se extienda por toda la celda. Tratar de utilizar un solo espaciador pequeño no daría un resultado satisfactorio pues todavía permitiría cierto movimiento entre celdas [121].



*Figura 31. Ejemplo separadores rígidos [121].*

Además, en el caso de utilizar celdas prismáticas, estas deben mantenerse bajo cierta presión de unión para evitar que los devanados interiores se expandan y se dañen pues se reduciría la vida de las celdas. Por tanto, los separadores de estas celdas deben

crear suficiente presión entre ellas, pero sin cubrir la superficie por completo para que la refrigeración no se vuelva ineficaz.

Un diseño de separador de celdas apropiado para una batería con celdas prismáticas se describe en la patente de los Estados Unidos N° 8709644. Los espaciadores en este diseño forman un retenedor tipo cartucho como se ve en la Figura 32. El conjunto espaciador incluye costillas que actúan como soportes y una pluralidad de costillas aislantes conectadas entre ellos. Juntos forman un hueco diseñado para albergar una celda. Los separadores de celdas descritos en esta patente también incluyen una parte superior y una brida inferior para evitar el movimiento vertical. Por otra parte, las costillas están escalonadas en la dirección Z para facilitar el uso de una herramienta unidireccional para su fabricación. Proporciona un diseño de acoplamiento automático y elimina la necesidad de dos moldes distintos por lo que los costes de fabricación son más bajos [65].

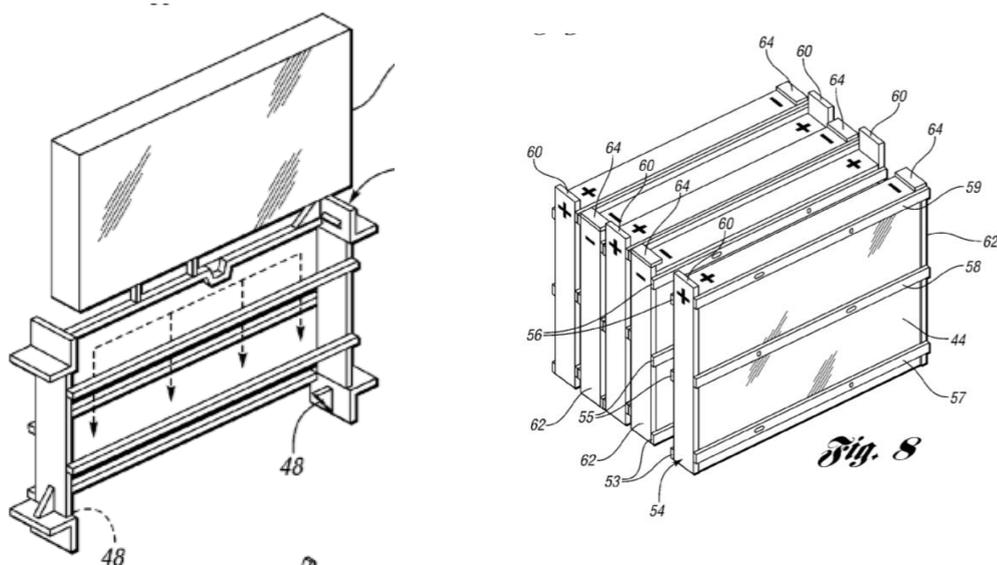


Figura 32. Ejemplo diseño separadores celdas prismáticas.

Es esencial que el material utilizado para el separador y los soportes tenga una masa relativamente baja, lo que minimice su contribución a la masa total de la batería. El material elegido también debe ser aislante eléctrico y con una conductividad térmica baja.

Se suele usar un polímero termocontraíble que proporciona un buen aislamiento eléctrico. Este aislamiento evitará cortocircuitos y chispas cuando las celdas estén compactas. Sin embargo, los polímeros son unos malos conductores térmicos y son vulnerables al ambiente corrosivo. El aislante evitará que el calor generado se disipe de

una forma eficaz a los alrededores, aumentando la tasa de envejecimiento térmico de la celda[122] .

### 3.4.3. Paquete de baterías

El paquete de baterías (*battery pack*) está formado por módulos de baterías conectados en serie, paralelo o una combinación de ambos sistemas. Además, suele incluir el sistema de control de las baterías (BMS, *Battery Managment System*), el sistema de control de la temperatura (TMS, *Thermal managment system*) y *elementos de control de* [115].

El paquete de baterías es alojado en un contenedor(*housing*) de plástico o metal. En la Tabla 14 se muestra algunos ejemplos que los materiales que se utilizan para el contendor del paquete de baterías en distintos vehículos eléctricos[108].

Vehículo	Material para el contenedor del paquete de baterías
Tesla Roadster	Aluminio
Honda Fit EV	Acero
Chevrolet Volt	Acero
Chevrolet Spark EV	Composite
BMW i3	Aluminio

Tabla 14. Ejemplo de los materiales del contenedor del paquete de baterías en EVs.

El contenedor ( *housing*) del paquete de baterías puede aprovecharse para realizar varias funciones como el control de la temperatura, requerimientos mecánicos, protección ante impactos...[123]

La batería tiene que mantenerse en una temperatura confortable para un funcionamiento adecuado. Los contenedores que sean aislantes térmicos puede ser una solución. Como se ve en la Figura 33[123], se puede combinar el aislamiento con sistemas activos de control de la temperatura.

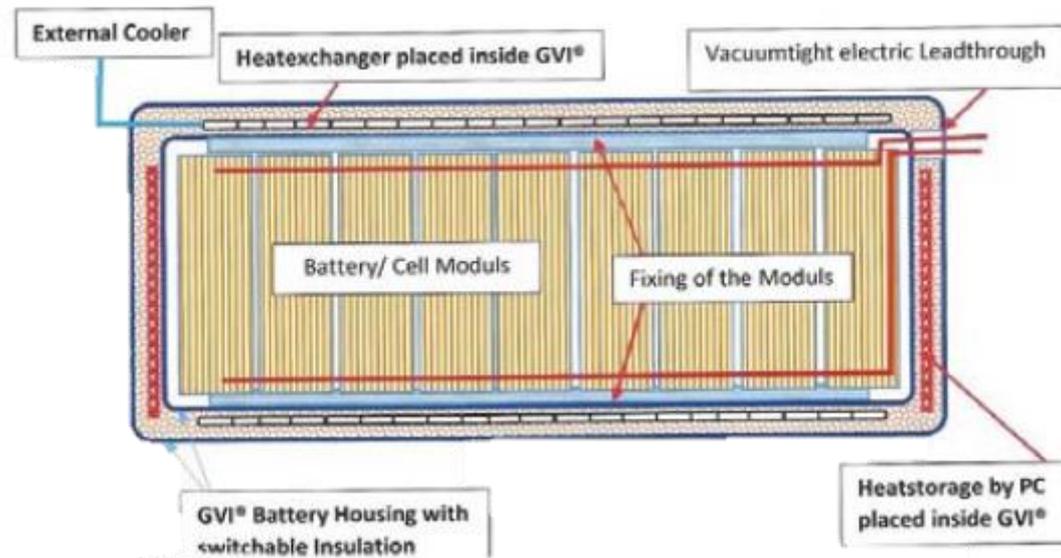


Figura 33. Ejemplo de contenedor(housing) aislado junto con sistema activo de control de temperatura[123]

En muchos casos, en los vehículos eléctricos, el propio contenedor (housing) del paquete de baterías forma parte de la estructura del vehículo como se ve en la Figura 34 [123]. Esta es una solución de arquitectura integral, lo que perjudica la adaptabilidad del paquete, pero se obtiene un diseño más adaptado al vehículo para el que va a ser usado.



Figura 34. Ejemplo de arquitectura integrada de un paquete de baterías[123].

Por otro lado, para evitar la propagación del embalamiento térmico (*thermal runaway propagation*) entre distintos módulos, la Patente de los Estados Unidos Núm. 8663824 describe un diseño de un paquete de baterías que se divide en compartimentos. En la Figura 35 puede verse el diseño del paquete que incluye un miembro central que separa el paquete en compartimentos a la izquierda y a la derecha, además de proporcionar un sitio conveniente para situar las líneas de energía y comunicación. En este diseño existe un espacio de aire entre cada módulo y su compartimento que asegura que no haya conducción de calor entre dos módulos de batería adyacentes[124].

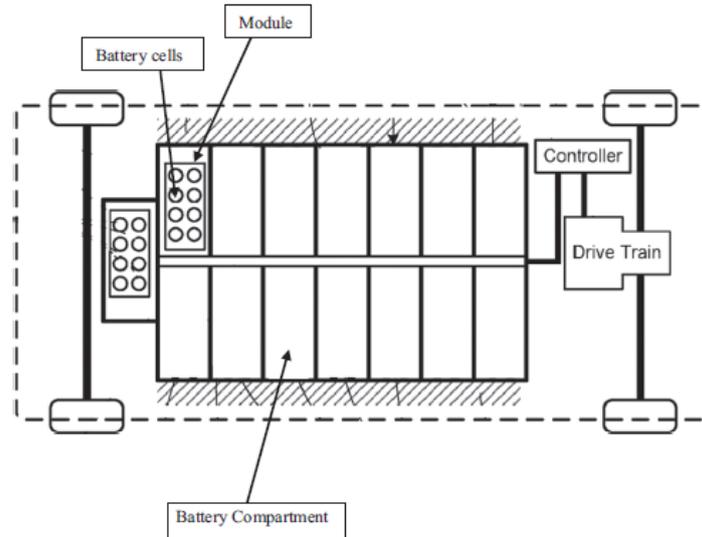


Figura 35. Diseño de paquete de baterías de la Patente de EEUU Núm. 8663824

En el diseño de un paquete de baterías es necesario incorporar un escape de gas. Se suelen utilizar boquillas de escape que se abren durante un embalamiento térmico liberando el gas a través de un conducto hacia una zona que no sea peligrosa.

En la Figura 36 [125] se muestra una boquilla de escape de gas. Durante su funcionamiento normal se mantiene cerrada para prevenir que cualquier contaminante, como escombros de la carretera y humedad, no ingrese la batería. Una válvula de compensación de presión está integrada en la boquilla de escape. Esta proporciona un medio para manejar las diferencias de presión debido a eventos no térmicos durante su funcionamiento normal (por ejemplo, debido al cambio de altitud). Durante una sobrepresión interior que pueda causar un embalamiento térmico, una válvula mayor se abre liberando un mayor flujo de gas. Esta válvula se volverá a cerrar cuando pase este evento.

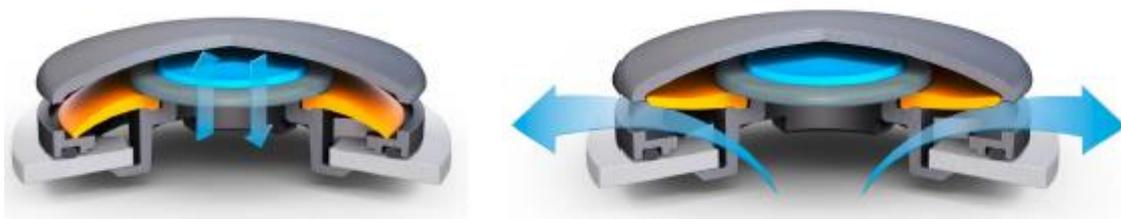


Figura 36. Boquilla reguladora de presión. Izda: Funcionamiento normal. Dcha: Liberación exceso presión [125]

La Patente de los Estados Unidos Núm. 8663824 propone utilizar una tuerca para mantener la boquilla cerrada durante su funcionamiento normal. Esta tuerca se diseña para que con una cierta presión y/o una temperatura dentro de la batería se derrita y/o deforme lo suficiente para permitir la salida de los gases. La boquilla está fabricada de acero o cerámica, que no se ven afectados por el aumento de la temperatura, de tal manera que, continúe guiando los gases calientes en un dirección que minimice cualquier daño [124].

En la configuración que se muestra en la Figura 37 [124, 126], los compartimentos de la batería están perforados. Durante un embalamiento térmico, los gases generados dentro de las celdas de la batería pasan a través de estas perforaciones en los compartimentos hacia un conducto de gas que dirige el gas fuera de la batería.

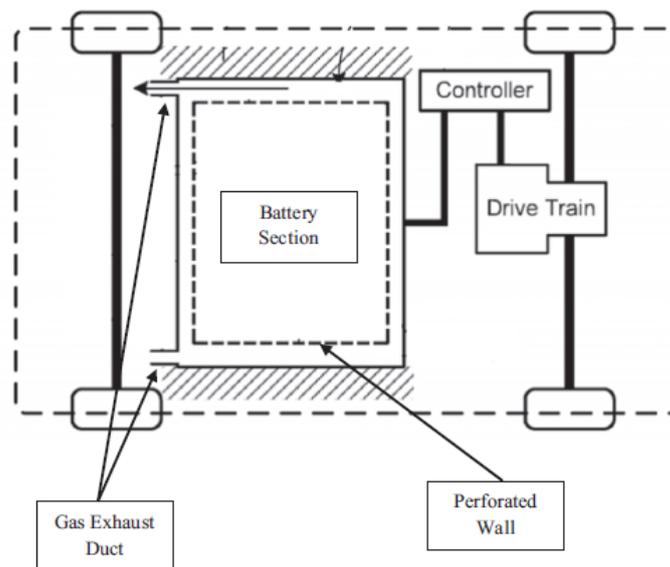


Figura 37. Diseño de un conducto para liberación de gases durante un embalamiento térmico [124, 126].

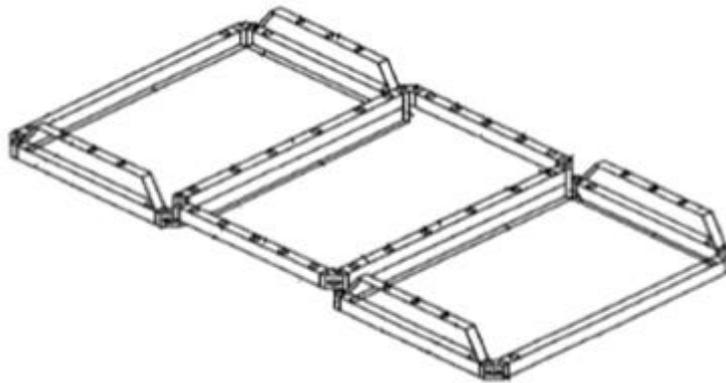
#### 3.4.4. Interfaz mecánica

La interfaz mecánica entre el paquete de baterías y el chasis del vehículo tiene una gran influencia en la amortiguación de las vibraciones.

Las vibraciones a lo largo del eje Z, es decir, la dirección vertical, se consideran las más severas. Tanto los soportes verticales como los laterales deben proporcionar la estabilidad necesaria. Para ello, una fuerza de compresión es generalmente aplicada a la superficie superior de los paquetes de baterías.

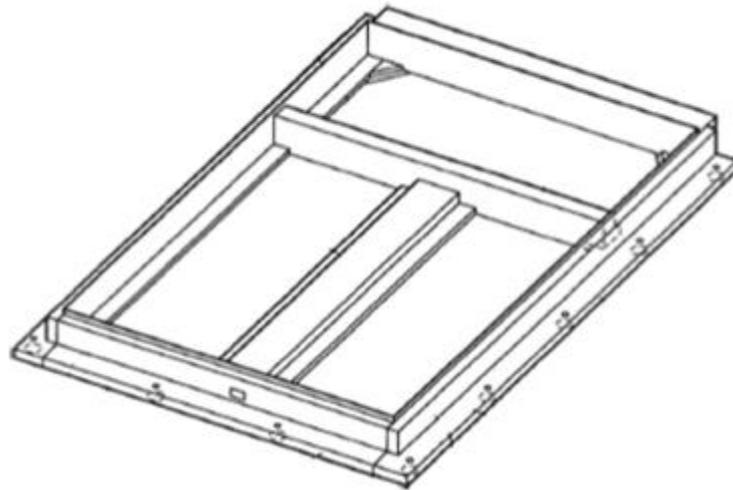
La Patente de EE. UU. 7507499 propone un diseño, que se puede ver en Figura 38, para estabilizar una batería en vehículos eléctricos mediante el uso de una bandeja cubierta por una espuma. Esta bandeja se atornilla a la estructura del vehículo para proporcionar el soporte a la batería. Fijar los tornillos comprime la espuma de amortiguación [127].

La espuma de amortiguación es necesaria para eliminar cualquier movimiento en la dirección vertical. Debe estar hecha de un material antideslizante y tener suficiente resistencia para absorber vibraciones e impactos. Los materiales más adecuados son los plásticos, como NYLON.RTM., polifenilo, sufonas o polidiciclopentadienos [127].



*Figura 38. Diseño de una bandeja para estabilizar el paquete de baterías propuesto en la patente de los EE.UU. n° 7507499*

La patente de EE. UU. n° 8561743 describe una estructura de un paquete de baterías que ayuda a lograr un peso uniforme del vehículo manteniendo un centro de gravedad bajo. En este diseño, el paquete de baterías incluye: la carcasa, los módulos de batería, el arnés, la caja de interruptores, la caja de conexiones y la unidad de control. El diseño como se ve en la Figura 39 hace uso de un montaje rectangular. Se ha dividido en dos secciones, delantera y trasera por un nervio que ha sido soldado al marco. Además, un nervio divide la sección frontal en dos áreas rectangulares iguales [128].



*Figura 39. Estructura de paquete de baterías propuesto en la patente de EE. UU.  
n°8561743*

Aunque en la mayoría de los casos, la interfaz mecánica entre el paquete de baterías y el vehículo es cerrada, como se mencionó en el subcapítulo 2.4, existe la posibilidad de diseñar una interfaz abierta. Una interfaz abierta permite conectar paquetes de baterías personalizados proporcionados por terceros, puede soportar la personalización del producto, la adaptabilidad, la extensibilidad, la apertura, la capacidad de cambio, etc. [97]

En las referencias [95] [97] se desarrolla una metodología de diseño de interfaces abiertos y se aplica al paquete de baterías de un vehículo eléctrico. Este método de diseño se muestra en la Figura 40. Consta de:

- 1) Identificación de la ubicación de la interfaz y desarrollo del esquema de diseño inicial.
- 2) Optimización de la interfaz considerando la adaptabilidad funcional.
- 3) Optimización de la interfaz considerando el rendimiento.

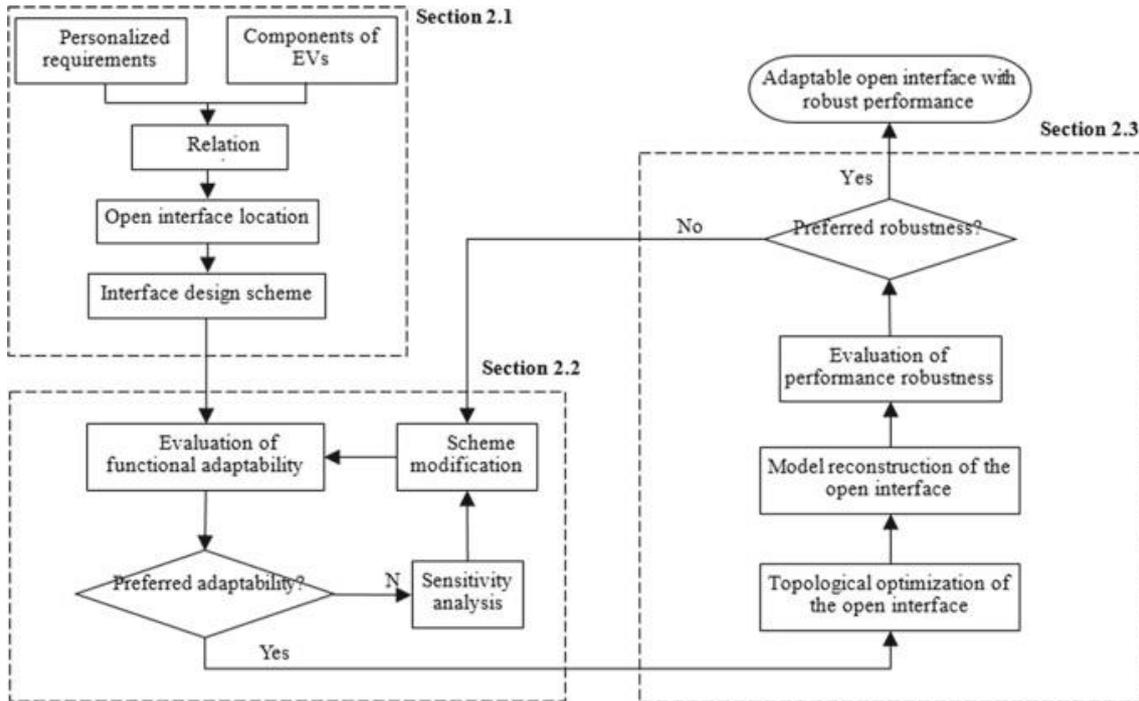


Figura 40. Metodología de diseño de un interfaz abierto para un paquete de baterías de un vehículo eléctrico [95]

El diseño final que proponen se muestra en la Figura 41. Consta de una bandeja adaptable para poder conectar y desconectar paquetes de baterías de distintos tamaños. Para ello, utilizan ranuras en forma de U y unos bloques de fijación (*fixing blocks*), que se pueden ajustar, en las esquinas. Para la sujeción del paquete utilizan pernos. El sistema de amarre se puede observar con detalle en la Figura 42.

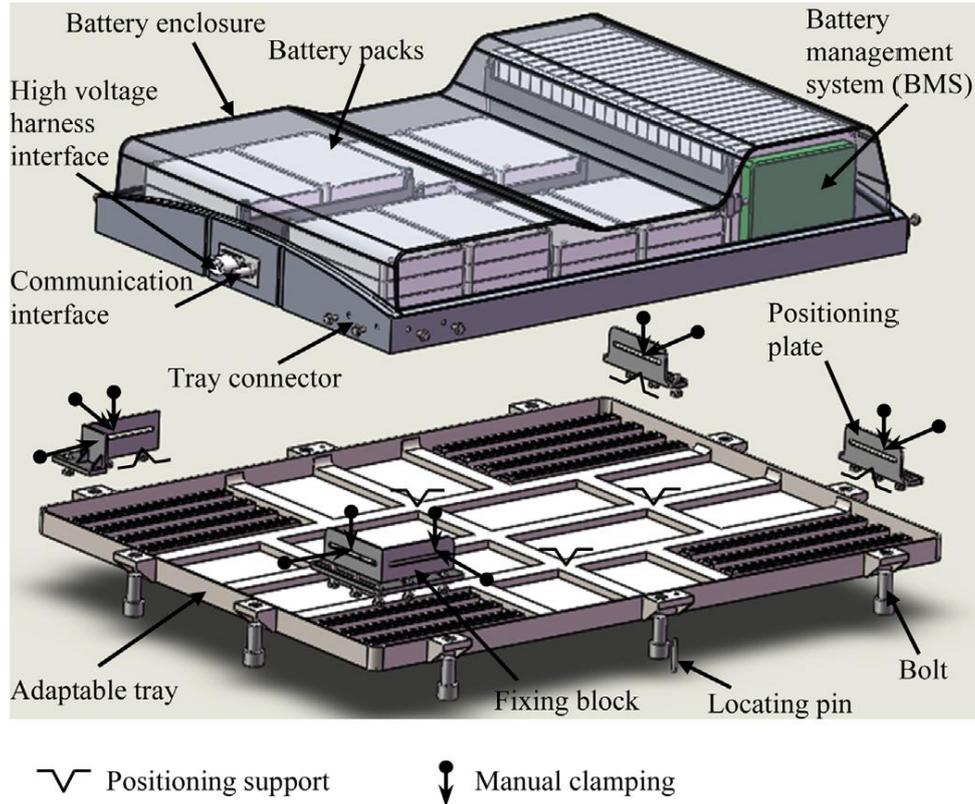


Figura 41. Diseño propuesto de interfaz abierto entre vehículo y paquete de baterías [97]

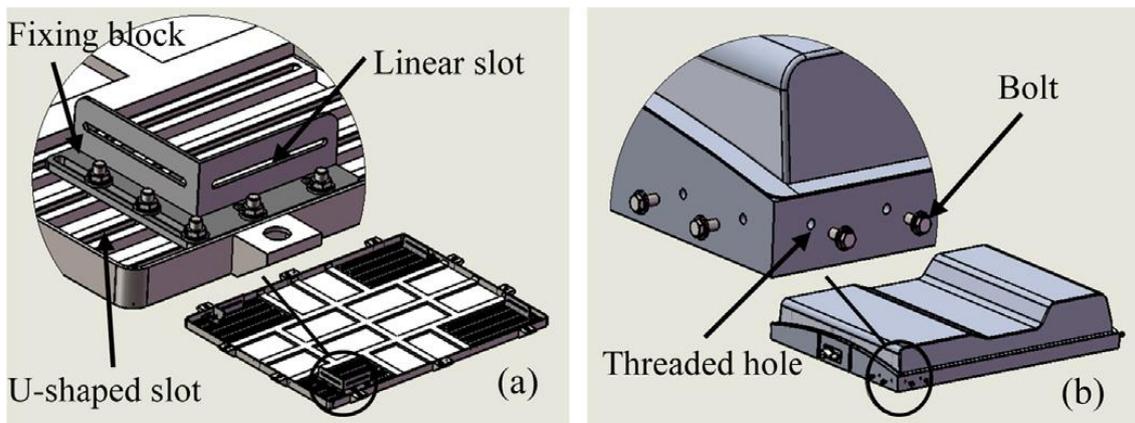


Figura 42. Detalle del sistema de agarre en el diseño propuesto de interfaz abierto entre vehículo y paquete de baterías [97].

Para la mayoría de los vehículos eléctricos existentes, en especial los coches, esta solución de interfaz abierto no será considerada, pero para otros vehículos como los autobuses puede tener una gran utilidad.

### 3.4.5. Interfaz eléctrica

En los vehículos eléctricos, las celdas de ion de litio pueden conectarse en serie y/o en paralelo. Con la conexión en serie de las celdas se obtiene la tensión necesaria y con la conexión en paralelo se aumenta la capacidad.

La tensión típica de un módulo está alrededor de los 50V. Una tensión mucho mayor tendría que ser considerada como peligrosa [129].. El número de celdas que pueden conectarse en un módulo, además, está limitado por la capacidad de monitorización del sistema de control de la batería (BMS, *Battery Management System*) [105].

Las conexiones entre las celdas pueden realizarse por soldadura por puntos o con tornillos. Las conexiones por tornillos son más flexibles lo que favorece el mantenimiento de celdas. Por otro lado, las conexiones por soldadura ofrecen una menor resistencia de contacto [108].

Las conexiones entre los módulos se pueden realizar conectando barras de bus de cobre. Esta es la solución más habitual en paquetes de baterías con alto nivel de integración, pero, una solución también muy recurrida cuando se diseñan módulos con una mayor estandarización es utilizar contactores como los de la Figura 43 [130]. Con ellos se permite una mayor adaptabilidad a diferentes configuraciones del paquete. Las conexiones de los módulos determinan la capacidad y tensión del paquete. En los paquetes de baterías que se utilizan en autobuses la tensión suele ser de entre 400V y 800V. Una de las ventajas de un paquete de baterías de mayor tensión es la posibilidad de utilizar barras de bus de menor tamaño y las menores pérdidas en el cobre [105].



Figura 43: Conectores para módulos de batería [130].

Para la conexión externa del paquete de baterías con el vehículo diferentes fabricantes de acuerdo con la normativa de instalaciones eléctricas de alta tensión diseñan conectores como los de la Figura 44.



Figura 44. Conectores de alta tensión para paquete de baterías (Izda[131], Dcha[132])

### 3.4.6. Interfaz de control y comunicación

Los sensores que se encuentran en cada módulo están conectados a un microcontrolador llamado sistema de gestión de batería (BMS, Battery Management System). El BMS protege la celda contra una sobretensión o subtensión, sobrecorriente durante la carga o descarga, sobret temperatura, subtemperatura y el equilibrio de celdas [133]. Los BMS Esclavos (Slave) de cada módulo que compone el paquete se vinculará a BMS maestro a través de un protocolo de comunicación estándar como el bus CAN (Controller Area Network) [129]. En la Tabla 15 se muestran diferentes topologías de BMS[105].

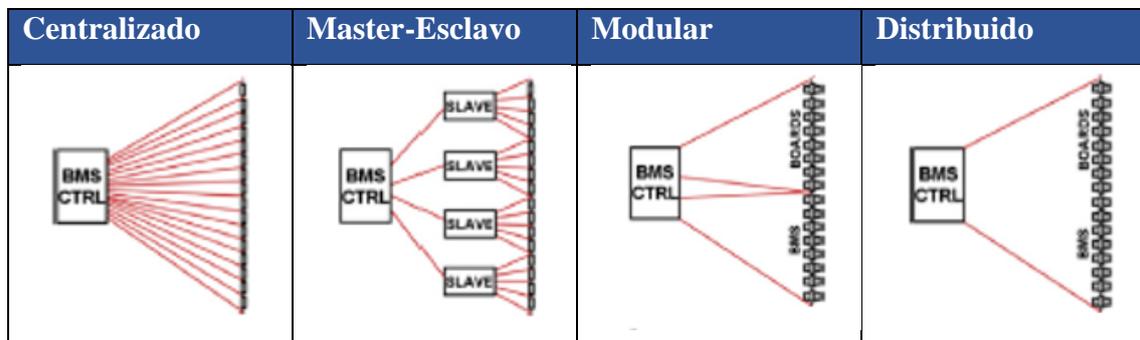


Tabla 15. Diferentes topologías de BMS para un paquete de baterías

### 3.4.7. Interfaz térmico

La temperatura de la batería afecta de forma muy importante al rendimiento y vida de esta. [134]. Para controlar que la temperatura se mantenga en un rango adecuado se utilizan sistemas de gestión de la temperatura (TMS, *Thermal Managment Systems*). El sistema de gestión de temperatura, a menudo, tiene una parte externa al paquete (sistema de bombeo o ventilación) y una parte interna (evacuación de calor).

Existe principalmente tres sistemas para la gestión térmica de los vehículos eléctricos: enfriamiento en serie, enfriamiento paralelo y enfriamiento híbrido [135].

- En el enfriamiento en serie, el fluido de enfriamiento ingresa desde un extremo de la batería para recoger el calor de la celda y sale por el otro extremo. La misma cantidad de líquido refrigerante está expuesta a varios módulos de batería[122] [135].
- En el enfriamiento paralelo, la cantidad total de fluido refrigerante se divide en partes iguales y cada porción de fluido refrigerante fluye sobre un solo módulo. El enfriamiento paralelo produce una distribución de temperatura más uniforme en la batería [122] [135].
- El enfriamiento híbrido, este tipo de arquitectura es una combinación de enfriamiento en serie y paralelo. La arquitectura de flujo híbrida se encuentra comúnmente en las baterías que comprenden muchos módulos dispuestos de manera irregular en la batería[122] [135].

Se utilizan varios tipos de medios de transferencia de calor, como aire, líquido, material de cambio de fase, enfriador termoeléctrico, tubería de calor o una combinación de ellos en el sistema de gestión térmica del paquete de baterías. La elección del sistema de gestión térmica depende de la restricción de los vehículos eléctricos, los costes de instalación, la densidad del paquete, el entorno exterior... pero la restricción más importante puede que sea la potencia de carga del paquete de baterías. En la Figura 45, se relaciona distintos sistemas de refrigeración (Aire, Aire forzado, Líquido) con la potencia de carga del paquete de baterías.

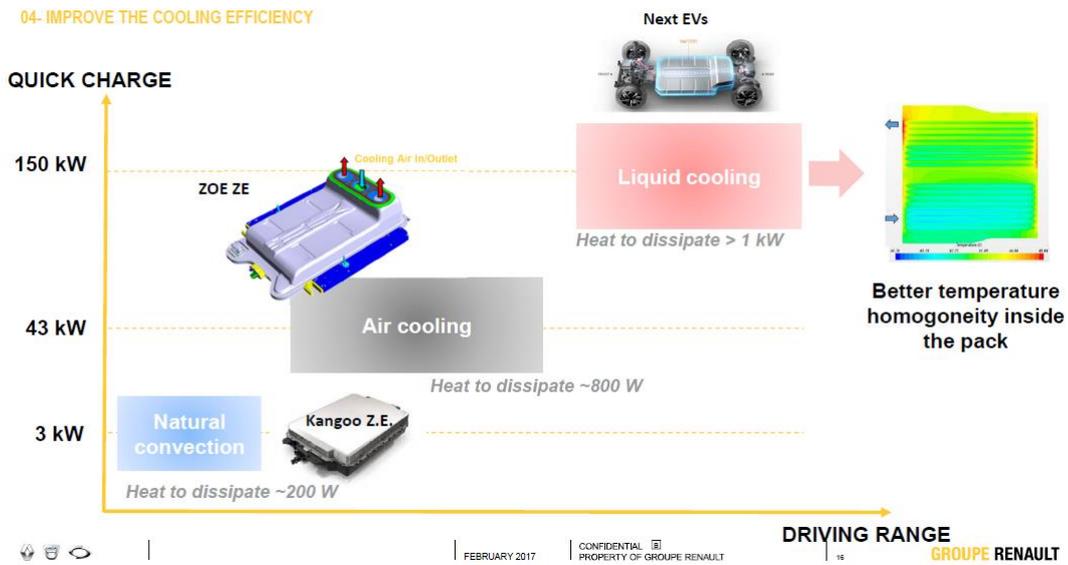


Figura 45: Sistema de refrigeración en función de la potencia de carga. [116]

Como se observa en la Figura 45 en los vehículos de carga rápida suele utilizarse una refrigeración mediante líquido. La refrigeración mediante líquido tradicionalmente se ha realizado mediante los métodos que se comparan en la Tabla 16 [136]

Refrigeración en una cara	Refrigeración en áreas intermedias
<ul style="list-style-type: none"> <li>+Fácil de implementar</li> <li>+Aprovecha la alta conductividad térmica de los materiales</li> <li>-Pequeña área de contacto</li> <li>-Altas diferencias de temperaturas en la celda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+Mayor área de contacto</li> <li>+Mejor distribución de temperatura</li> <li>-Sistema más complejo</li> </ul>

Tabla 16: Comparación de métodos tradicionales de refrigeración líquida

Debido al número de sistemas de control de temperatura existentes, es complicado buscar un interfaz estándar entre el sistema de gestión térmica y el paquete. En la mayor parte de los casos, la gestión de la temperatura dependerá del propio diseño del paquete.

### 3.5. Ejemplos de paquetes de baterías para vehículos eléctricos

Por último, antes de empezar con el diseño del paquete de baterías, se mostrará algún ejemplo de paquetes de baterías. Se focalizará en aquellos que tengan una aplicación de autobús eléctrico puesto que es la aplicación que interesa en el presente trabajo como ya se ha explicado previamente.

#### 3.5.1. Autobús MAN

La conocida marca de camiones MAN ya tiene en el mercado autobuses eléctricos como el de la Figura 46 [102]. Este autobús tiene una autonomía de 270km y un motor con una potencia de 160kW.



*Figura 46. MAN Lion's City BUS [102].*

Un esquema funcional de este autobús se muestra en la Figura 47 [102] pudiéndose observar un diseño con una arquitectura modular similar al que se expuso en el subcapítulo 3.3. Como se puede observar, la principal ventaja de utilizar una arquitectura modular en este caso es su escalabilidad. Este autobús utiliza un conjunto de paquetes de baterías de 750V con una capacidad de 80kWh cada uno. En función del tamaño del autobús, se adaptará el número de paquetes conectados en paralelo para aumentar la capacidad total. Por ejemplo, el autobús que se muestra en la Figura 47 es un autobús de 12 m que utiliza 6 paquetes de baterías de 80kWh cada uno obteniendo una capacidad total de 480kWh. En caso de un autobús de 18m, se utilizarían 8 paquetes obteniendo una capacidad de 640kWh [102].

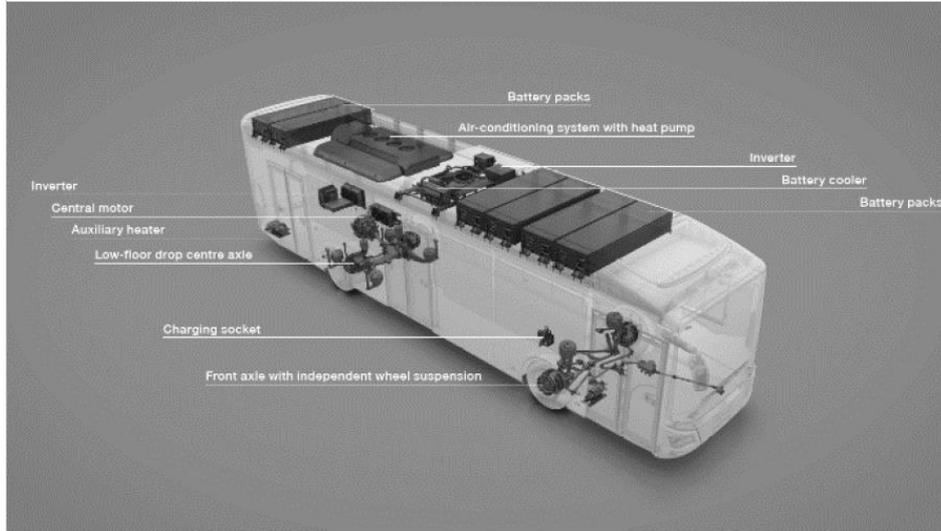


Figura 47: Esquema de grupos funcionales de autobús MAN [102].

En la Figura 48 se puede ver una vista explosionada del paquete de baterías que utiliza este autobús. En ella se puede observar los componentes principales del paquete. Este paquete utiliza módulos con celdas tipo cartucho (*pouch*) que son refrigeradas por los terminales. Cada módulo tiene un controlador que se conectará al BMS situado en un externo del paquete.

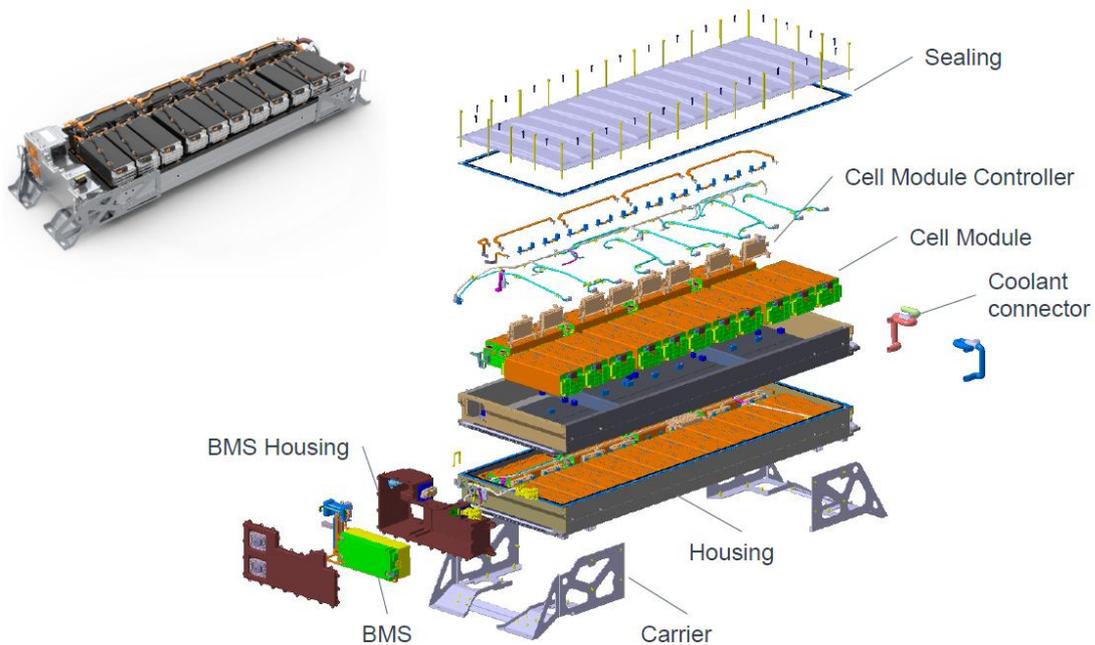


Figura 48. Vista explosionada de paquete de baterías autobús MAN [102].

Para obtener los 80kWh y los 750V, utiliza 30 módulos, como el de la Figura 49, conectados en serie. Se trata de un módulo que se utiliza en otros vehículos del Grupo Volkswagen. Cada módulo utiliza dos ramas en paralelo con 6 celdas cada una(6s2p). Se trata de celdas tipo cartucho (*pouch*) con tecnología NMC de la marca LG de una capacidad de 60Ah y tensión de 3.68V.



Tensión nominal: 22V
Capacidad: 120Ah
Energía: 2.65kWh
Energía específica: 252Wh/kg
Energía volumétrica: 268 Wh/L

*Figura 49. Módulo y características principales utilizado en paquete baterías del autobús MAN [102].*

### 3.5.2. AKASOL

AKASOL es una empresa que se dedica al diseño de paquetes de baterías. Uno de sus clientes es Mercedes Benz. AKASOL suministra el paquete de baterías del modelo eCITARO que se puede ver en la Figura 50[137].



*Figura 50. Autobús eCITARO con paquetes de baterías AKASOL [137].*

En la Figura 51 se puede ver otro esquema funcional del autobús, en el que como en el autobús de MAN el paquete de baterías se situaría en la parte superior del autobús.

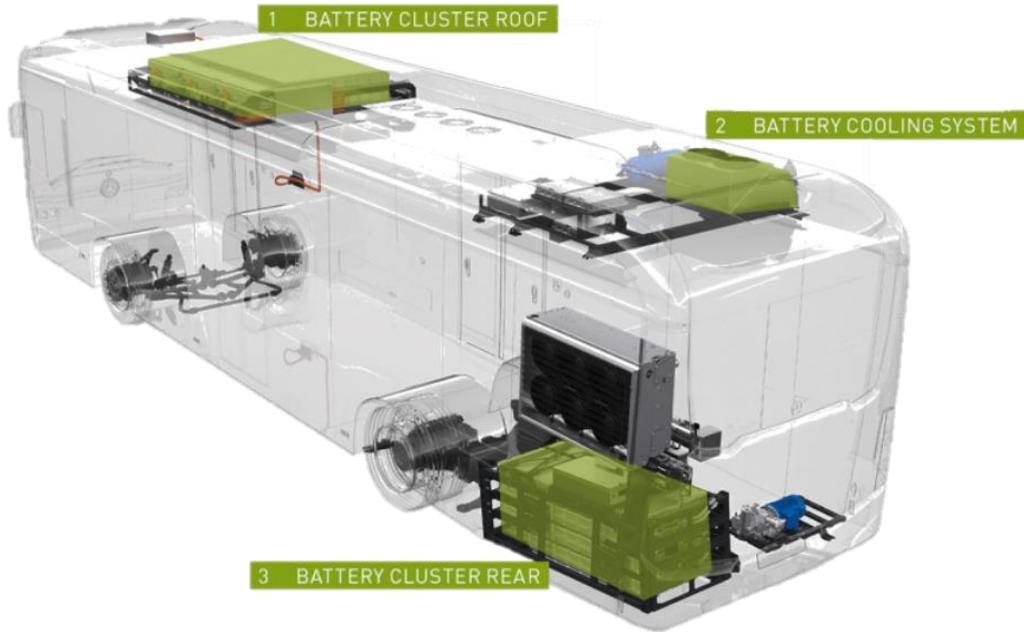


Figura 51. Esquema funcional del paquete de baterías AKASOL [137].

En AKASOL utilizan los 3 tipos de formatos de celdas (cilíndricas, cartucho(*pouch*) y prismática) para formar módulos como los que se muestra en la Figura 52. A partir de ellos, en función de la aplicación para la que vayan a ser destinados, forman el paquete de baterías.

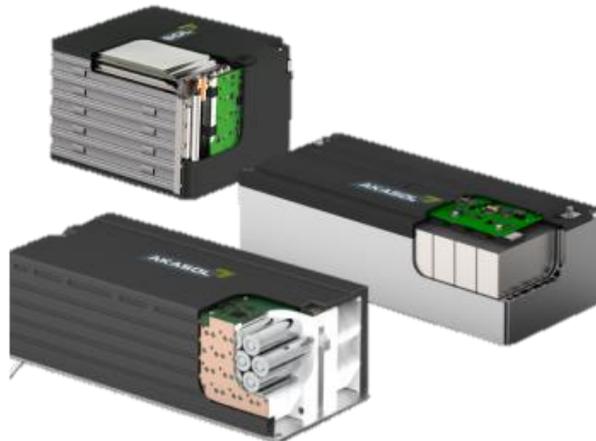
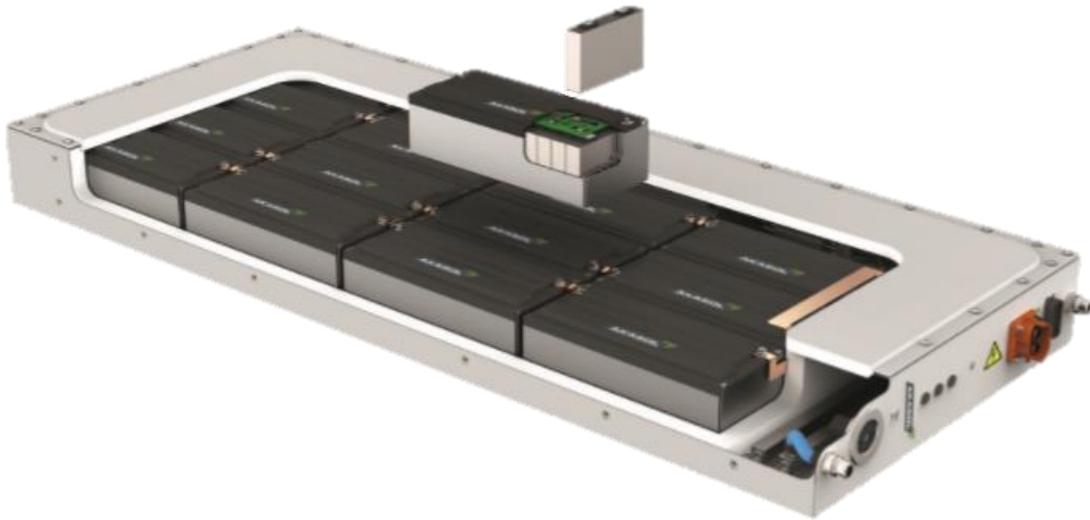


Figura 52. Diferentes módulos de AKASOL con diferentes formatos de celda [137].

En la Figura 53 se muestra el paquete de baterías del autobús eCITARO que utiliza módulos de celdas prismáticas. Lo mayor diferencia con respecto al paquete de MAN es su sistema refrigeración. Utilizando una lámina que conduce el calor por la parte inferior de los módulos se consigue un sistema un sistema independiente del módulo. Gracias al

diseño de una arquitectura modular, AKASOL puede ofrecer una gran variedad de tamaños de paquetes.



*Figura 53. Paquete AKASOL (AKASYSTEM 15 OEM 50PRC) [137].*

El paquete de la Figura 53, utiliza 15 módulos en serie. Cada módulo contiene 12 celdas prismáticas NMC conectadas en serie con una capacidad de 50Ah/celda. La tensión nominal del paquete es 655V y la energía 33kWh. Con un peso 260kg y un tamaño de 1700mm x 700mm x 150mm, se obtienen una energía específica de 126Wh/kg y una energía volumétrica de 185Wh/L [137].

### 3.5.3. Otros paquetes

Se ha podido encontrar información de otros paquetes que, aunque no se disponga de tanto detalle como en los anteriores, aporta información ya sea de especificaciones o de diseño de paquetes que están en el mercado.

La empresa ENERDEL es una empresa estadounidense que se dedica a diseñar y fabricar paquetes de baterías de ion de litio. Al contrario que AKASOL, no ofrecen una alta escalabilidad y hay que elegir entre diferentes modelos en función de tu aplicación. En la Tabla 17 se muestran algunas especificaciones de los paquetes que recomiendan para autobuses eléctricos [138].

MODELO	PE320-689	PP320-738-LP
Foto		
Nº Módulos	14 serie	15 serie
Celdas por módulo	24 (12 s 2p)	24 (12 s 2p)
Tensión paquete	612.5 V	656 V
Capacidad	32 Ah	32 Ah
Energía	19,6kWh	21kWh
Dimensiones	1281mm x 967mm x 404mm	2050mm x 1116mm x 279mm
Masa	310 kg	430 kg
Wh/kg	63,22 Wh/kg	48,84 Wh/kg
Wh/L	39,17 Wh/L	32,9 Wh/L
Refrigeración	Líquido	Aire forzado

Tabla 17. Comparación paquetes de baterías ENERDEL

Por otro lado, en la Figura 54 se muestra el paquete de baterías del Audi Q7 e-tron [117]. Aunque en este caso no estamos tratando un paquete destinado a una aplicación de autobús, esta figura es de interés porque se muestra detalladamente las diferentes partes del paquete. Resulta interesante observar el método de refrigeración y la distribución de los módulos.

**Audi Q7 e-tron 3.0 TDI quattro**

Hochvolt Batterie  
High-voltage battery  
03/15

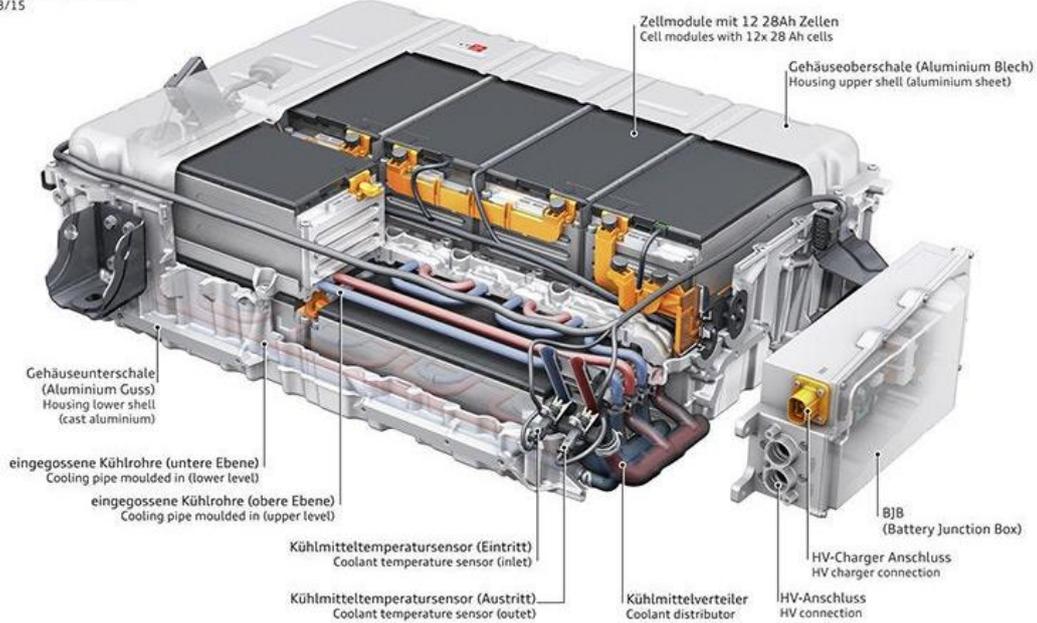


Figura 54. Paquete de baterías utilizado en Audi Q7 e-tron

### 3.6. Esquema modular conceptual del paquete de baterías

Tras haber realizado un estudio de las distintas soluciones técnicas para cada nivel del paquete de baterías e interfaces entre ellos, se puede realizar un esquema conceptual de la división modular del paquete de baterías y las interfaces entre ellos. Utilizando una división estructural similar a la del método de Stone explicado en el subcapítulo 2.3.1 y teniendo en cuenta los diferentes tipos de interfaces que se han definido en el subcapítulo 3.3, se realiza un esquema como el que se muestra en la Figura 55.

Posteriormente, en el capítulo 4, se utilizará este esquema para diseñar el paquete de baterías e ir definiendo los interfaces de cada relación.

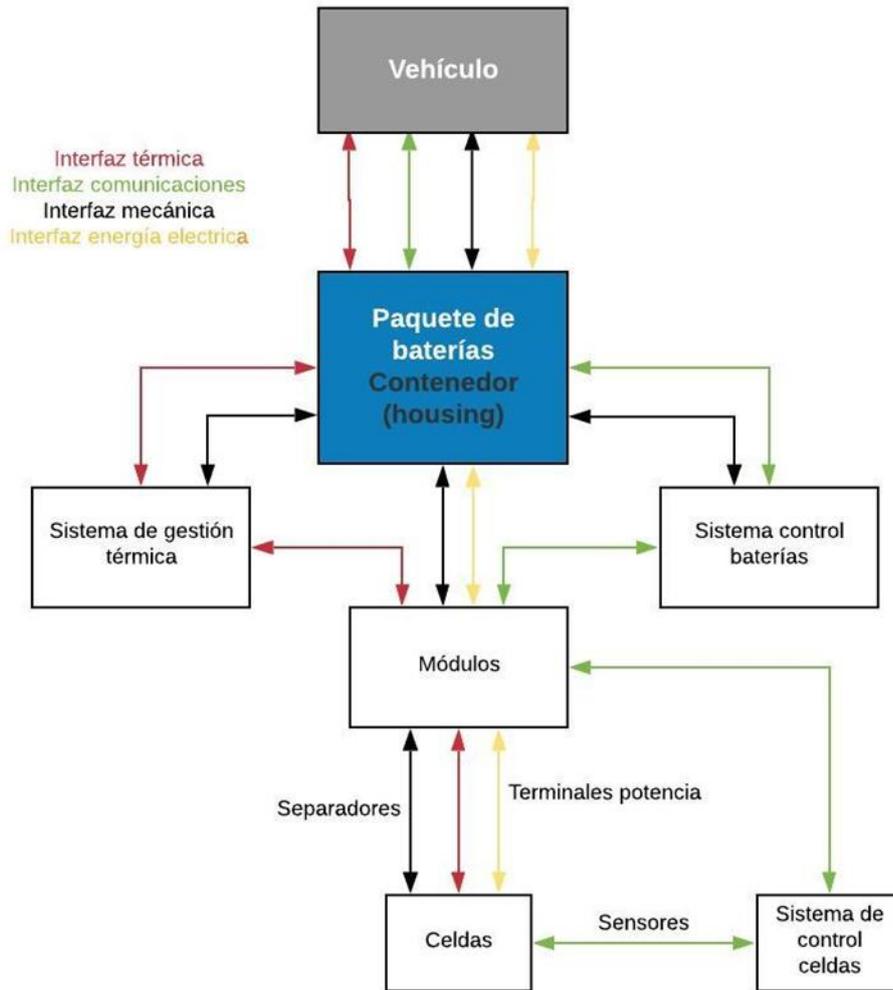


Figura 55: Esquema conceptual de la división modular del paquete de baterías.

## 4. DISEÑO DEL PAQUETE DE BATERÍAS MODULAR

Una vez que ya se ha realizado un estudio sobre las distintas soluciones técnicas que se han empleado hasta ahora para el diseño de un paquete de baterías, se procede a realizar el diseño propio. Para ello, en primer lugar, se definirá las características que se desean de nuestro paquete de baterías. En segundo lugar, se procede al diseño de cada nivel del esquema conceptual de la arquitectura propuesta en el subcapítulo 3.6.

El diseño propuesto se encuentra en una fase conceptual avanzada, pues el objetivo fundamental es aplicar la metodología modular, y la definición de interfaces en el diseño. Aspectos, como amarres o espesores, están establecidos de una forma aproximada. Será necesario que en un trabajo futuro se calcule los espesores y amarres para soportar los distintos esfuerzos a los que se ve sometido el paquete.

Durante este capítulo se mostrarán imágenes renderizadas del diseño propuesto para una correcta explicación del mismo. Para un mayor detalle se adjunta en el ANEXO 1 los modelos 3D tanto del módulo como del paquete en formato pdf.

### 4.1. Características del producto

Aunque se busca la estandarización con un diseño modular, para ciertos parámetros como la tensión o la capacidad del paquete, es necesario conocer la aplicación. En IKERLAN se piensa que pueden tener una mayor oportunidad de entrada en el mercado de los autobuses. Por ello, ya en el subcapítulo 3.5 se ha hecho un repaso de diferentes paquetes enfocados a esta aplicación. A parte de esta información bibliográfica, las características del producto se acuerdan en un grupo del departamento de energía y electrónica de IKERLAN.

La primera característica que es necesaria definir es la tensión nominal del paquete. Se considera adecuada una tensión de entre 600V y 800V. Para conseguir esta tensión, se conectarán varios módulos en serie. Como se mencionó en el subcapítulo 3.4.5, la tensión del módulo no suele ser muy superior de los 50V, pues a mayor tensión más elementos de protección se necesitarían. Además, será necesario tener en cuenta las limitaciones del BMS de cada módulo.

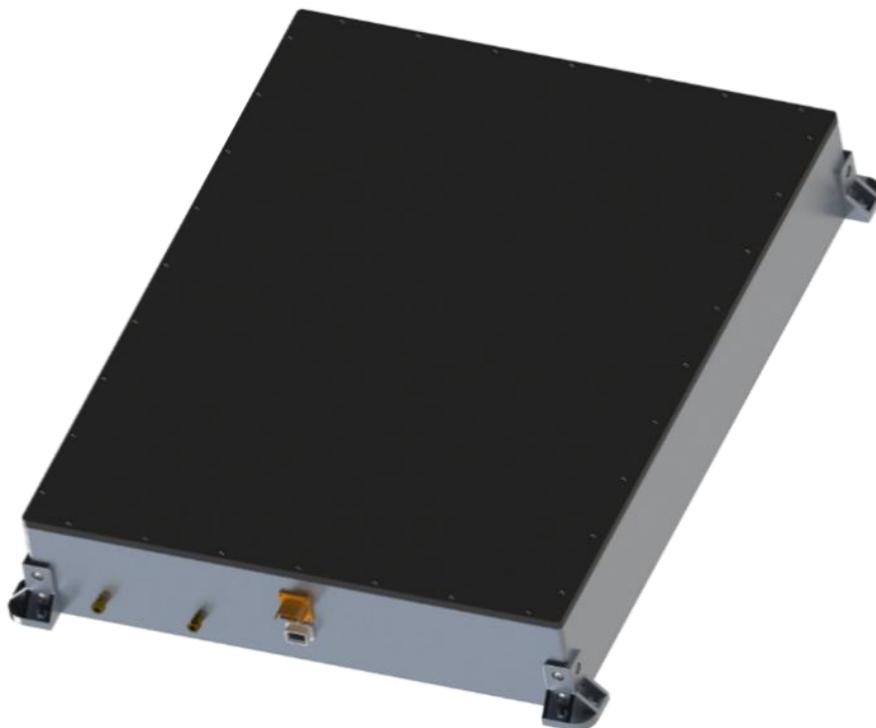
La segunda característica importante para definir es la capacidad. La capacidad que se desee depende de la autonomía del vehículo que se pretenda alcanzar y de las

características propias del vehículo. Aunque se ha fijado el autobús como la aplicación, en busca de una mayor escalabilidad, se optará por una solución como la que utilizan los autobuses MAN explicada en el subcapítulo 3.5.1. Es decir, la capacidad del paquete será la que se obtenga al conectar los módulos en serie para conseguir la tensión deseada. Si el vehículo necesita una mayor capacidad, se conectarán varios paquetes en paralelo multiplicando su capacidad.

Por último, aunque no es un requisito directo, el peso y el volumen han de ser lo mínimos.

### 4.2. Detalle del diseño del paquete de baterías

El diseño del paquete final se muestra en la Figura 56. En este subcapítulo se irá descomponiendo el diseño siguiendo el esquema que se mostró en el subcapítulo 3.6 y que sirvió de guía para el presente diseño.



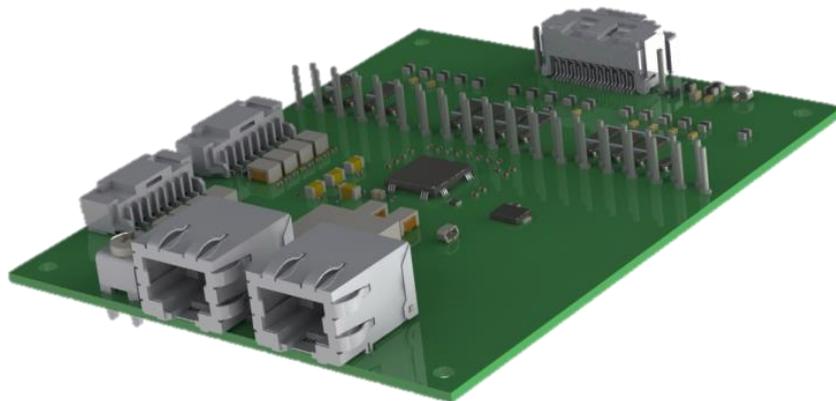
*Figura 56: Diseño de paquete de baterías*

#### 4.2.1. Sistema de control de las baterías

Uno de los objetivos del presente trabajo era realizar el diseño de un módulo que pudiera servir como demostrador para un BMS diseñado por IKERLAN. Se trata de un

BMS Slave que se encaja dentro de una tipología distribuida de control como la que se mostró en la Tabla 15 del subcapítulo 3.4.6. En este tipo cada módulo tiene un BMS Slave, que se conecta al siguiente módulo, conectando el primer y último módulo al BMS Máster. Es necesario habilitar un espacio en el paquete para el BMS Máster. Para tratar que el diseño sea lo más modular posible, el BMS Máster junto con otros elementos de seguridad se ubicarán en un recipiente similar al módulo al que en el diseño se ha llamado “Power box”

En la Figura 57 se muestra el BMS diseñado por IKERLAN que se utilizará en el diseño del módulo. Se trata de un BMS Slave que ha sido diseñado con seguridad funcional con un nivel de integridad de la seguridad en automoción ASIL C. El BMS Slave está destinado para ser integrado en una batería basada en litio de hasta 1000 V, en una aplicación de tracción y de automoción. Es altamente configurable. Se puede adaptar para utilizarse con hasta 18 celdas. El límite inferior de celdas está fijado por tensión, siendo ésta de 16 V. Cuenta con 4 medidas de temperatura redundadas, aunque éstas se pueden configurar como medidas diferenciales, u 8 medidas simples. Cuenta con diversos mecanismos de seguridad, implementados en el hardware para llevar a cabo diagnósticos como la detección de cable desconectado o de cortocircuito en el circuito de equilibrado. En cuanto a las comunicaciones, utiliza el protocolo de comunicación diferencial reversible-isoSPI.



*Figura 57: BMS Slave diseñado por IKERLAN.*

La interfaz de comunicación entre módulos, es decir, la conexión entre los diferentes BMS Slaves y el BMS Master se realizan con conectores RJ45 como los de la Figura 58.



*Figura 58: Interfaz de comunicación entre módulos. Conector RJ45 [139].*

Para interfaz de comunicaciones externa del paquete de baterías, es decir, la comunicación entre el paquete y el vehículo se utilizará un conector de comunicaciones destinado a aplicaciones de automóviles como el de la Figura 59. Este conector irá conectado con el “Power box” donde se encuentra el BMS Master.



*Figura 59: Interfaz de comunicaciones entre paquete y vehículo [140].*

#### 4.2.2. Sistema de gestión térmica

Como se ha mencionado en el subcapítulo 3.4.7, la elección del sistema de refrigeración más adecuado influye directamente en el diseño del paquete. No se ha encontrado la forma de utilizar una interfaz térmica para el paquete que sea reconfigurable a distintos sistemas (aire, aire forzado, líquido). Por ello, se opta por elegir el sistema que sería más adecuado. Finalmente, se elige utilizar un sistema de refrigeración líquida. Este sistema es el más versátil, el que mayores capacidades de carga permite, el que mejora la vida útil de las baterías, pero también es el que añade un mayor peso y encarece más el paquete. Esta decisión se ve reforzada cuando se revisan los diferentes ejemplos

mostrados en el subcapítulo 3.5, en el que la mayoría utilizan un sistema de refrigeración líquido.

En la Figura 60 se muestra el sistema de gestión de temperatura empleado en el paquete. En ella se muestra una placa de aluminio, en la que en su interior circula un líquido refrigerante. La placa de aluminio conduce el calor desde los módulos, que estarán sobre ella, hasta el líquido refrigerante.



*Figura 60: Lámina de sistema de refrigeración del paquete de baterías diseñado*

Es necesario recordar que el presente diseño se encuentra en una fase conceptual avanzada, y en una etapa posterior sería necesario dimensionar la placa y la cantidad de líquido refrigerante necesario en función del calor que haya que evacuar del paquete. Además, este diseño debe realizarse junto con el diseño de la parte del sistema de refrigeración externo al paquete.

La interfaz térmica externa del paquete, es decir, la conexión de la parte del sistema de refrigeración interna del paquete (la placa de aluminio) con la parte externa del paquete (el sistema de bombeo) será dos conectores RACOR (entrada y salida) como

el de la Figura 61. Existe de multitud de diámetros y modelos en función de la dimensión del sistema de refrigeración.



*Figura 61: Interfaz térmica externa del paquete. Conector RACOR [141].*

#### 4.2.3. Contenedor (housing)

El diseño del contenedor (Housing) es la parte más externa del paquete de baterías. Como se muestra en la Figura 62, este constará de una caja de aluminio, debido a su ligereza, y una tapa de plástico atornillada a la caja. En su interior se utilizará un material antideslizante y aislante térmico como NYLON.RTM., polifenilo, Sufonas o polidiciclopentadienos. Este recubrimiento interior del contenedor se justifica por dos motivos que se explicaron en el subcapítulo 3.4.3 y 3.4.4

- 1) Interesa que sea un contenedor aislado térmicamente para que la única transmisión de calor que se produzca sea entre los módulos y el sistema de refrigeración.
- 2) Este recubrimiento servirá para amortiguar vibraciones y ajustar las tolerancias en dirección vertical.



*Figura 62: Contenedor (Housing) del paquete de baterías diseñado.*

Al contenedor irá atornillada la interfaz externa entre el paquete y el vehículo. Se utilizará una escuadra como la de la Figura 63, de tal forma, que pueda ser empleada para distintos vehículos. Se trató de diseñar una interfaz abierta, es decir, que de una forma sencilla el paquete pueda ser amarrado a distintos vehículos, como el ejemplo que se mostró en el subcapítulo 3.4.4.



*Figura 63: Interfaz mecánica entre el paquete de baterías y el vehículo.*

#### 4.2.4. Módulos

En la Figura 64 se muestra el módulo diseñado. Exteriormente se puede apreciar dos cuerpos: la tapa y la caja. La caja, de aluminio, consta de una pared lateral que será extraíble, de tal manera que se facilite el montaje de las celdas. La tapa, de plástico, irá atornillada a la caja, y como se comentará más adelante, tendrá un papel fundamental en la restricción vertical del movimiento de las celdas. El módulo irá atornillado a la lámina de refrigeración del paquete, lo que se puede considerar la interfaz mecánica entre módulo y paquete.



*Figura 64: Diseño propuesto del módulo*

A continuación, se describen los aspectos más importantes del interior del módulo.

##### 4.2.4.1. Elección de celda

Como ya se ha mencionado en el subcapítulo 3.4.1, la elección de celda es fundamental para determinar las futuras características del paquete. Para la elección de celda se podría utilizar alguno de los métodos multiobjetivo explicados en el subcapítulo 2.5. En el presente trabajo no se realizará dicho trabajo pues, desde el departamento de energía de IKERLAN, ya se han encargado de seleccionar la más adecuada. Se utilizará la celda L48N60B de la marca CALB que se muestra en la Figura 65.



Figura 65: Celda L48N60B CALB

Se trata de una celda cuyas características principales se recogen en la Tabla 18. Es necesario destacar, su formato prismático y su tecnología de iones de litio NMC.

	L148N50B (CALB)
Química	NCM
Capacidad	50Ah (Descarga Standard)
Tensión Nominal	3,65V
Rango de tensión de trabajo	2,75V-4,3V (T>0°C)
Rango de temperatura de trabajo	-20°C~55°C
Carga Standard	C/3
Carga máxima	1,2C
Descarga máxima	8C
Peso	861g
Dimensiones	148,2mm x 26,66mm x 101,9mm (0,402L)
Energía Específica	212 Wh/kg
Energía volumétrica	454 Wh/L

Tabla 18: Características de la celda L148N50B (CALB) utilizada en el diseño.

#### 4.2.4.2. Separadores

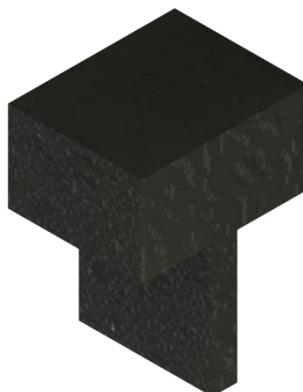
Como ya se ha mencionado en el subcapítulo 3.4.2, las celdas necesitan estar separadas una cierta distancia (1 o 2mm) que permita que en caso de que las celdas se dilaten, no entren en contacto unas con otras. Además, los separadores cumplen la función de mantener en su posición inicial las celdas. En el subcapítulo 3.4.2, se mencionaban varios ejemplos de separadores, en el diseño propuesto, es necesario restringir el movimiento de las celdas en los tres ejes.

Para restringir en el plano horizontal se utilizará una pieza como la de la Figura 66. Se trata de una pieza de aluminio en forma de L a la que iría encajada la celda. Además, esta lámina tendría la función de conducir el calor desde la celda hacia la parte inferior del módulo que está en contacto directo con la lámina de refrigeración.



*Figura 66: Separador en forma de L*

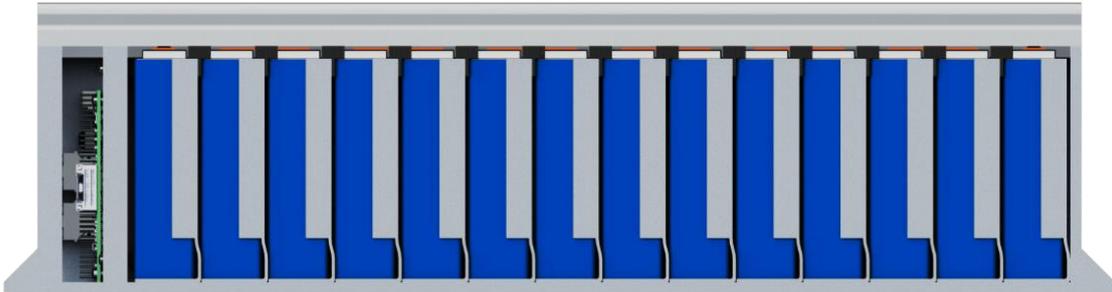
Por otro lado, se diseñaron unos separadores, como los de la Figura 67, que se colocan a ambos lados de la celda en la parte superior entre cada celda. Estos separadores están en contacto con la tapa del módulo, que se atornillará a la caja del módulo restringiendo de esta manera el movimiento vertical. Los separadores serían de un material, que pudiera admitir los posibles defectos de tolerancias en la dirección vertical que pudieran darse.



*Figura 67: Separador superior celdas*

En la Figura 68 se muestra una sección del módulo en la que puede apreciarse el funcionamiento de los separadores anteriormente descritos. Además, se puede apreciar

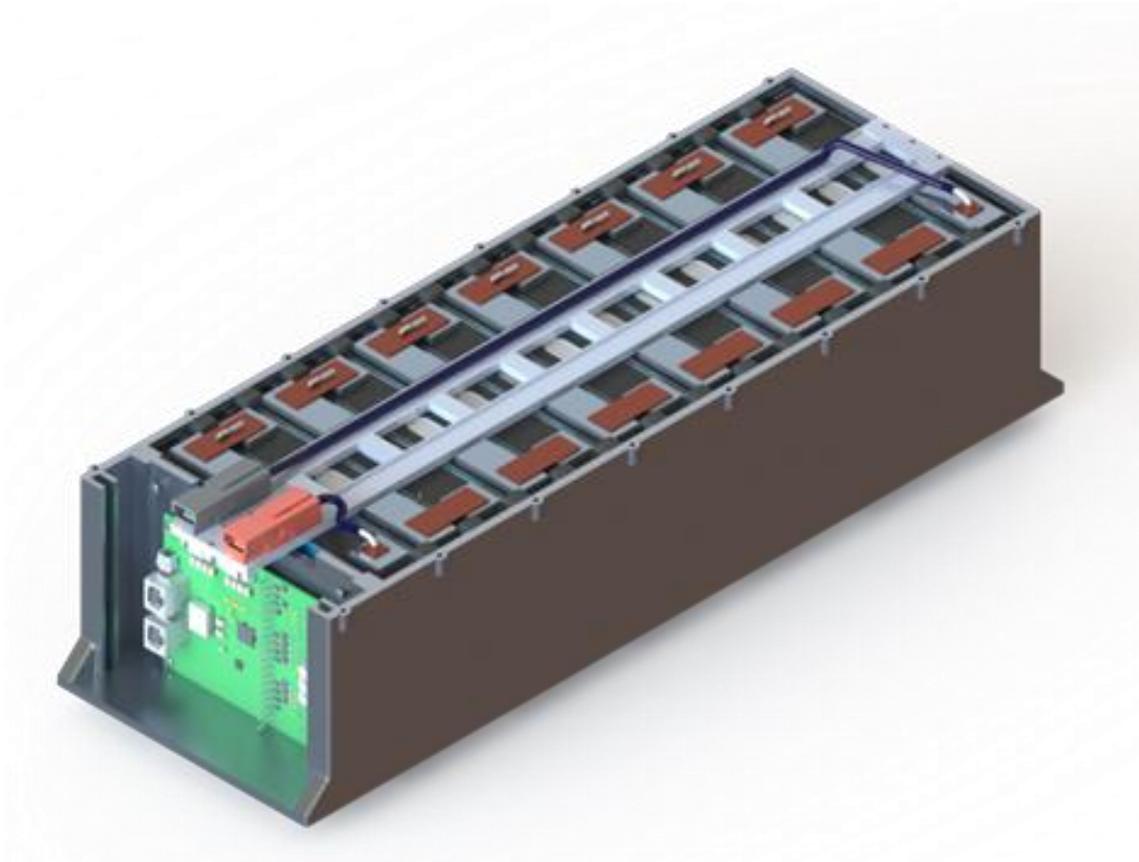
la ubicación que tendría el BMS Esclavo del módulo. El BMS estaría situado en una pared interior extraíble. Esta pared además se utiliza para, mediante unos tornillos acolchados, presionar las celdas en la dirección horizontal.



*Figura 68: Sección lateral del módulo diseñado.*

#### *4.2.4.3. Conexiones interiores*

En la Figura 69 se muestra el módulo sin la tapa. En esta vista se puede apreciar el número de celdas, 14, todas ellas conectadas en serie. Sabiendo que el BMS empleado obliga a que el número de celdas sea inferior a 18, se ha optado por 14 para que la tensión nominal del módulo sea de alrededor 50V. ( $14\text{celdas} \times 3,65\text{V/celda} = 51,1\text{ V}$ ).



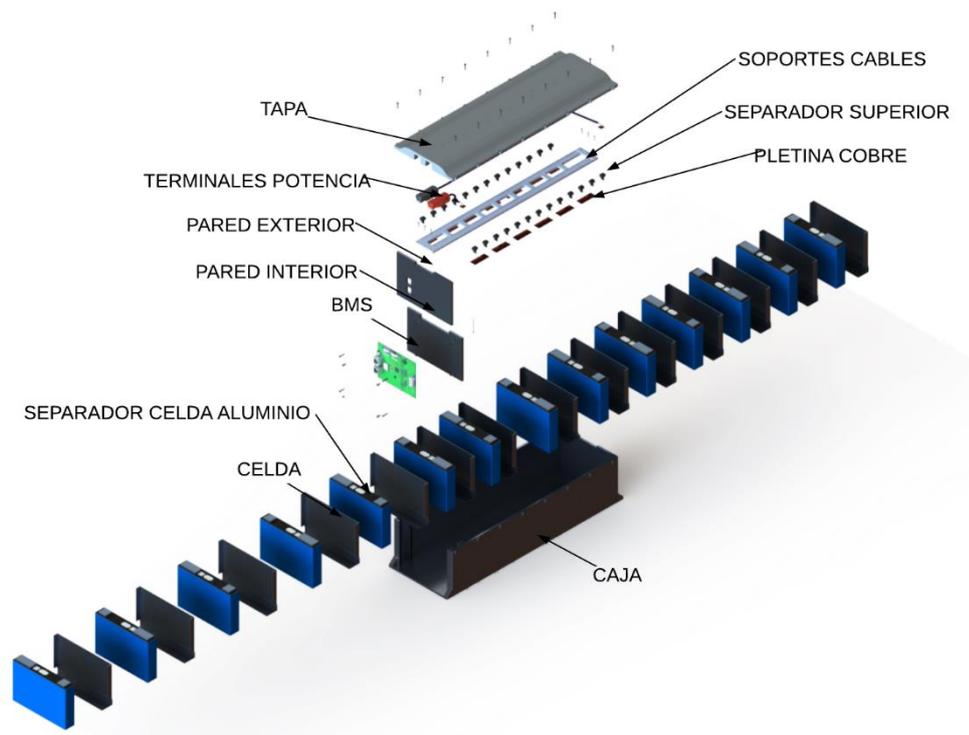
*Figura 69: Vista interior del módulo diseñado*

Las conexiones entre las celdas se realizan con unas pletinas soldadas de cobre. La opción de atornillarlas, que se mencionó en el subcapítulo 3.4.5, no era posible de utilizar en estas celdas.

El terminal negativo de la última celda y el positivo de la primera se conectarían, a unos terminales de salida del módulo. Estos terminales ya se habían mostrado en el capítulo 3.4.5 en la figura 41.

Por otro lado, sobre las celdas se encuentra un soporte superior, atornillado a la caja, que sirve de camino para los distintos cables, entre ellos, los de los sensores. Aunque no se aprecia en la figura, el módulo, contaría con cables conectados desde los terminales de cada celda hasta el BMS para controlar y equilibrar la tensión, y de sensores de temperatura NTC entre cada celda conectados con el BMS para controlar la temperatura.

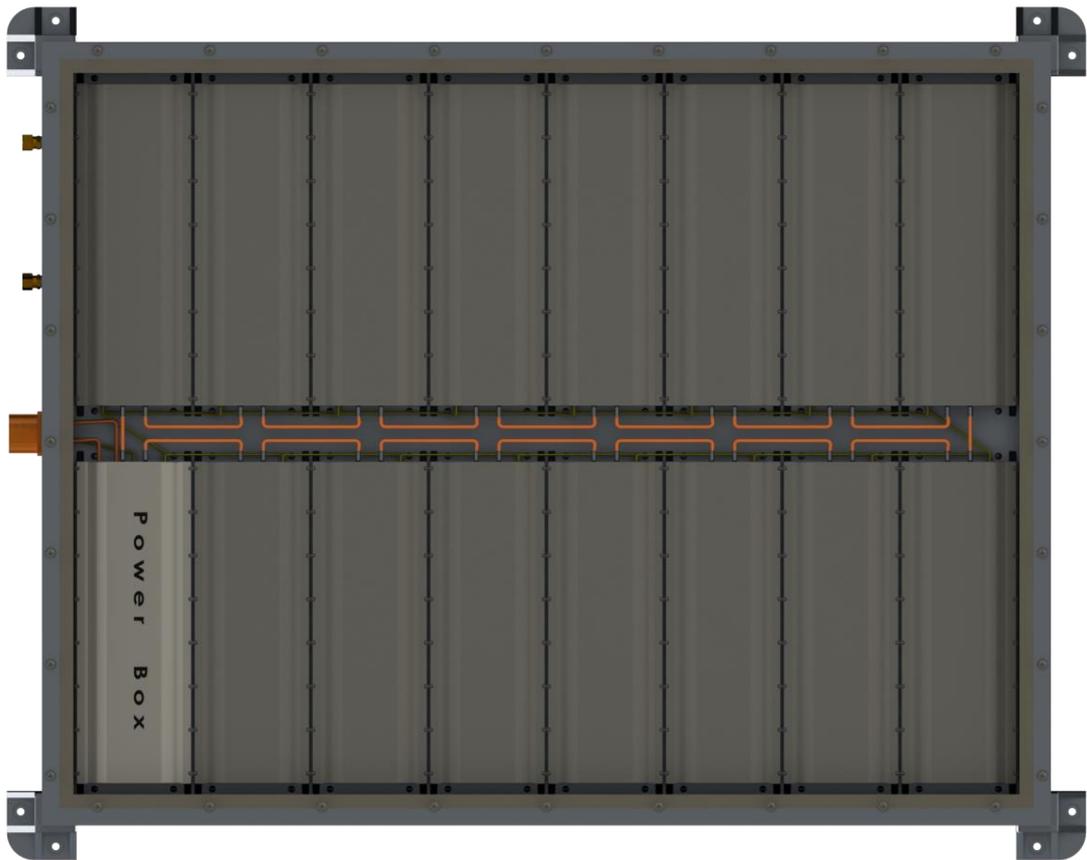
Finalmente, en la Figura 70 se muestra un explosionado del módulo para apreciar todos sus componentes.



*Figura 70: Explosionado del módulo diseñado*

#### 4.2.5. Conexiones del paquete

En la Figura 71 se muestra el interior del paquete. Consta de 15 módulos, que se conectan en serie para obtener una tensión nominal de  $(15 \cdot 51,1)766,5V$ . Además, se puede apreciar el llamado “Power Box”, que, con un tamaño similar a un módulo, albergará el BMS Master y los sistemas de seguridad necesarios por los que pasará la potencia durante la descarga o carga del paquete. La conexión en serie de los módulos, tanto de la energía (representada por cables en color naranja) como de las comunicaciones entre los BMS Esclavos (representada por cables en color amarillo) se iniciará y terminará en el Power Box, que tendrá unas salidas hacia el exterior del paquete de baterías.



*Figura 71: Interior del paquete de baterías diseñado*

La salida de comunicaciones del paquete de baterías ya se mostró en la Figura 59, y la interfaz de potencia será un conector como el de la Figura 72 [132].



*Figura 72: Interfaz eléctrica externa del paquete de baterías diseñado.*

### 4.3. Evaluación del diseño

El último paso del proceso de diseño que se lleva siguiendo en este caso de estudio y que se indicó en subcapítulo 2.6 es la evaluación del diseño realizado.

En la Tabla 19 se muestra las principales características que tendría el módulo y el paquete diseñado. En ella, las dimensiones, serían aproximadas pues todavía se tendría que definir en detalle. Por ese mismo motivo, solo se muestra la masa relativa a las celdas, que es la única que se sabe con certeza en esta fase del diseño.

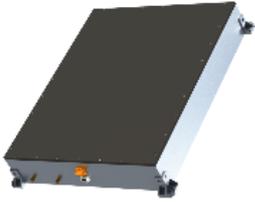
MODELO	Módulo	Paquete
<b>Foto</b>		
<b>Celdas</b>	14 serie	210 (serie)
<b>Nº módulos</b>	1	15 (serie)
<b>Tensión nominal</b>	51,1 V	766.5 V
<b>Capacidad</b>	50 Ah	50 Ah
<b>Energía</b>	2,56kWh	38,3 kWh
<b>Dimensiones</b>	493mm x 129,5mm x 163mm	1439mm x 244,5mm x1126mm
<b>Masa (solo celdas )</b>	12 kg	180kg
<b>Wh/kg* (Solo celdas)</b>	213 Wh/kg	213 Wh/kg
<b>Wh/L</b>	246 Wh/L	96,7 Wh/L
<b>Refrigeración</b>	-	Líquido

Tabla 19: Especificaciones del paquete y módulo diseñados

El paquete diseñado recoge las ventajas que se deseaban obtener de un diseño modular:

- Gracias a una gran definición de interfaces, se permite que, en futuros diseños, se pueda modificar el diseño del módulo sin que afecte a las otras partes del paquete.
- La placa de refrigeración que se utilizó en el paquete como interfaz térmica es un sistema no invasivo al módulo. Esto permite que, tratando de conducir el

calor dentro del módulo hacia la parte inferior que está en contacto con la placa de refrigeración, se pueda utilizar otro tipo de celdas en el módulo, como podrían ser las celdas cilíndricas o tipo cartucho (pouch).

- La energía del paquete puede no ser suficiente para un determinado vehículo. Gracias a la definición de los interfaces externos (térmicos, eléctricos, de control y mecánicos), se pueden conectar varios paquetes en paralelo, para aumentar su capacidad. Esta es otra de las ventajas de un sistema modular, la escalabilidad.
- Las conexiones eléctricas tanto dentro del paquete como dentro del módulo pueden cambiarse fácilmente. Por ejemplo, se podrían conectar 3 ramas en paralelo de 5 módulos en serie para tener una tensión de 250V para otra aplicación que lo pueda requerir. De la misma manera, en el módulo, se pueden conectar, por ejemplo, 2 ramas en paralelo de 7 celdas en serie, para tener una tensión de 25 V en el módulo. Con estas conexiones se puede ofrecer distintas opciones de tensión del paquete sin cambiar el diseño.
- Respecto a los requisitos necesarios como el aislamiento de vibraciones, evitar el embalamiento térmico o la resistencia al impacto, se han seguido las recomendaciones estudiadas como el uso de materiales que absorben las vibraciones dentro del paquete o el uso de separadores para evitar el movimiento de las celdas que pueda provocar un embalamiento térmico. Para terminar de diseñar completamente el módulo, habría que estudiar los esfuerzos a los que se ve sometido, y que cumple con la legislación pertinente para que sea debidamente certificado.

Finalmente, en la Tabla 20 se muestra una comparación entre el paquete diseñado, y los otros que se habían mostrado de ejemplo en el subcapítulo 3.5. No es fácil valorar la idoneidad del paquete pues, aspectos como la seguridad, el montaje, el mantenimiento o la idoneidad de la refrigeración, que afecta directamente a la vida y el servicio del paquete, no vienen habitualmente recogidos en una tabla.

Las variables más comparables, por las propias definiciones de estas, son la energía específica (Wh/kg) y la energía volumétrica (Wh/L). Dependen en gran medida de la elección de la celda, pero, no siempre se elige la celda con mayor energía, sino que se trata de que este balanceada con la potencia que pueda admitir o entregar (razón de carga o descarga).

MODELO	IKERLAN	PE320-689	PP320-738-LP	AKASOL
Foto				
Celdas /módulo	14 (serie)	24 (12 s 2p)	24 (12 s 2p)	12 (serie)
Nº módulos	15 (serie)	14 serie	15 serie	15 serie
Tensión nominal	766.5 V	612.5 V	656 V	655 V
Capacidad	50 Ah	32 Ah	32 Ah	50Ah
Energía	38,3 kWh	19,6kWh	21kWh	33 kWh
Dimensiones (mm)	1439 x 244 x1126	1281x 967 x 404	2050 x 1116 x 279	1700x700x150
Masa	180kg (solo celdas)*	310 kg	430 kg	260 kg
Energía específica	213 Wh/kg *	63,22 Wh/kg	48,84 Wh/kg	126 Wh/kg
Densidad de energía	96,7 Wh/L	39,17 Wh/L	32,9 Wh/L	185 Wh/L
Refrigeración	Líquido	Líquido	Aire forzado	Líquido

Tabla 20: Comparación del paquete diseñado.

De la Tabla 20 se puede obtener varias conclusiones:

- Comparando las energías específicas, y recordando que en el paquete diseñado solo se está teniendo en cuenta la masa de las celdas, se puede apreciar, que el paquete de AKASOL es mucho mejor que los que ofrece ENERDEL. Esto podría deberse a que ENERDEL utilice otro tipo de celdas que permiten una mayor razón de carga y descarga. Además, si se compara el paquete diseñado con el paquete de AKASOL, se puede concluir que, las celdas suponen al 60% de la masa total del paquete, por lo que un correcto optimizado de la masa del resto de los componentes puede ser decisivo en el rendimiento del paquete.
- Comparando las densidades de energía, se puede confirmar que los paquetes diseñados por ENERDEL no se encuentran en la misma categoría que el paquete de AKASOL, y puede que estén pensados para aplicaciones híbridas en las que se requiera que el paquete pueda ofrecer una mayor potencia de carga y descarga (razón carga y descarga). El paquete diseñado, que utiliza unas celdas de la misma capacidad que AKASOL, con estas medidas

## Diseño multiobjetivo de un paquete de baterías modular para vehículo eléctrico

provisionales, estaría sobredimensionado, y habría que tratar de ajustar más las dimensiones para que fuera competitivo en un futuro diseño.

## 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer de este trabajo se dividen en varios apartados, siguiendo las tareas realizadas durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster:

A) Estudio de las arquitecturas modulares:

- El diseño de una arquitectura modular reduce la complejidad del producto y aumenta la variedad del producto.
- Un producto con una arquitectura modular permite una mayor adaptabilidad a cambios producidos, por ejemplo, por una mejora de un componente.

B) Búsqueda de metodologías existentes para definir módulos que se ajusten al proyecto:

- El método heurístico de estructura funcional del producto que es adecuado para modularizar una familia de productos.
- El desarrollo de la función modular (MFD) que es el más adecuado para definir variantes de diseño y decisiones estratégicas.
- La matriz de estructura de diseño (DSM) es el más adecuado para modularizar sistemas complejos donde hay demasiadas interacciones.
- Existen otros métodos derivados de estos. La elección del método más adecuado no resulta evidente y, en muchos casos, se pueden obtener resultados distintos.

C) Definición de interfaces:

- La definición de interfaces abiertos o estándares que permitan el desarrollo independiente de cada módulo es fundamental.
- Sin una buena definición de interfaz ente módulos se corre el peligro de diseñar un producto que tiene desventajas tanto de un producto modular como de uno integral.

D) Caso de estudio basado en el diseño de un paquete de baterías modular:

- El diseño del paquete de baterías debe tener en cuenta varias restricciones como evitar el embalamiento térmico, evitar las vibraciones y proteger el paquete ante accidentes.

- Existen diferentes patentes y normas que son de utilizar para realizar un diseño adecuado.
- El paquete de baterías es un módulo dentro de la descomposición modular del vehículo. Se utilizó un método que combina el método DSM y el método heurístico para definir las interfaces externas del paquete de baterías con el resto del vehículo (eléctrica, mecánica, térmica y de control).

E) Evaluación del diseño:

- El diseño modular del paquete de baterías permite una mayor escalabilidad, facilidad de montaje y mantenimiento o adaptarse a nuevos modelos de celdas.
- Se diseña una interfaz térmica que permite la adaptabilidad a distintos módulos, algo crucial en un diseño modular.
- La definición de interfaces realizada permite mejorar el paquete sin tener que cambiar el paquete entero.

## 5.2. Líneas futuras

Desde el punto de vista de diseño modular, podría ser interés trabajar más en profundidad alguna metodología modular con un producto que no forme parte de otros productos, como es el caso de un paquete de baterías que forma parte de un vehículo.

Una implementación de métodos multiobjetivo en el diseño puede aportar un gran interés siempre y cuando se consiga ejecutar de una manera sencilla e intuitiva y el beneficio de uso sea mayor que el coste que supone usarlas. Podría trabajarse en este aspecto aplicándolo, por ejemplo, a la elección de la autonomía óptima necesaria de un vehículo.

En lo que se refiere al diseño del paquete de baterías, como ya se ha ido comentando a lo largo del texto, sería necesario desarrollarlo en detalle. Aspectos como el sistema de refrigeración propuesto, la resistencia mecánica del paquete o el aislamiento de vibraciones son necesarios evaluar y dimensionarlo de acuerdo con ellos en un futuro trabajo.

Otro aspecto de interés sería el diseño de módulos exteriormente iguales, pero con diferentes tipos de celdas. Esto permitiría que el paquete no se quedara desfasado y actualizando únicamente el módulo, pudiera utilizar las mejores celdas que se vayan saliendo al mercado.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Ulrich, K.T., *Product design and development*. 2003: Tata McGraw-Hill Education.
2. Pahl, G. and W. Beitz, *Engineering design: a systematic approach*. 2013: Springer Science & Business Media.
3. De Fazio, T.L., S.J. Rhee, and D.E. Whitney, *Design-specific approach to design for assembly (DFA) for complex mechanical assemblies*. IEEE transactions on robotics and automation, 1999. **15**(5): p. 869-881.
4. Chiu, M. and O. GE, *Investigation of the Applicability of DfX Tools during Design Concept Evolution: A literature Review*. Journal of Product Development (under review), 2009.
5. Huang, G. and G. Huang, *Design for X: concurrent engineering imperatives, 1996*. Chapman and Hall.
6. Claudio, F., M. GERMANI, and M. MANDOLINI, *Multi-objective conceptual design: an approach to make cost-efficient the design for manufacturing and assembly in the development of complex products*, in *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*. 2017, Springer. p. 63-70.
7. Torre, B.M., *Diseño mecatrónico para la instalación de equipos de grandes dimensiones. Aplicación de la metodología Dfl a una planta solar*. 2019, Universidad de Oviedo.
8. Clark, K. and C. Baldwin, *Design rules. Vol. 1: The power of modularity*. 2000, Cambridge, MA: MIT Press.
9. Frandsen, T., *Evolution of modularity literature: a 25-year bibliometric analysis*. International Journal of Operations & Production Management, 2017.
10. Langlois, R.N., *Modularity in technology and organization*. Journal of economic behavior & organization, 2002. **49**(1): p. 19-37.
11. Voordijk, H., B. Meijboom, and J. de Haan, *Modularity in supply chains: a multiple case study in the construction industry*. International journal of operations & production management, 2006.
12. Ulrich, K., *The role of product architecture in the manufacturing firm*. Research policy, 1995. **24**(3): p. 419-440.
13. Lee, H.L. and C.S. Tang, *Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation*. Management science, 1997. **43**(1): p. 40-53.

14. Martin, M.V. and K. Ishii, *Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures*. Research in engineering design, 2002. **13**(4): p. 213-235.
15. Baldwin, C.Y. and K.B. Clark, *Modularity in the design of complex engineering systems*, in *Complex engineered systems*. 2006, Springer. p. 175-205.
16. Newcomb, P.J., B. Bras, and D.W. Rosen, *Implications of modularity on product design for the life cycle*. 1998.
17. Kusiak, A., *Integrated product and process design: a modularity perspective*. Journal of Engineering Design, 2002. **13**(3): p. 223-231.
18. Micheli, G.J., et al., *Modularization as a system life cycle management strategy: Drivers, barriers, mechanisms and impacts*. International Journal of Engineering Business Management, 2019. **11**: p. 1847979018825041.
19. Sanchez, R. and J.T. Mahoney, *Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design*. Strategic management journal, 1996. **17**(S2): p. 63-76.
20. Li, H., M. Yang, and S. Evans, *Classifying different types of modularity for technical system*. 2019.
21. Miller, T.D. and P. Elgard. *Defining modules, modularity and modularization*. in *Proceedings of the 13th IPS research seminar, Fuglsoe*. 1998. Aalborg University Fuglsoe.
22. Baldwin, C.Y., K.B. Clark, and K.B. Clark, *Design rules: The power of modularity*. Vol. 1. 2000: MIT press.
23. Gershenson, J.K. and G.J. Prasad. *Product modularity and its effect on service and maintenance*. in *Proceedings of the 1997 maintenance and reliability conference*. 1997.
24. Ishii, K., *Modularity: A key concept in product life-cycle engineering*. Handbook of Life-cycle Engineering, 1998: p. 511-530.
25. de Aguiar Corrêa, L., F.I. Kubota, and P.A.C. Miguel, *Towards a contribution to modularity concepts and principal domains*. Product: Management & Development, 2017. **10**(2): p. 119-130.
26. Jiao, J. and M.M. Tseng, *A methodology of developing product family architecture for mass customization*. Journal of Intelligent Manufacturing, 1999. **10**(1): p. 3-20.
27. Duray, R., et al., *Approaches to mass customization: configurations and empirical validation*. Journal of operations management, 2000. **18**(6): p. 605-625.

28. Mikkola, J.H., *Modularity, component outsourcing, and inter-firm learning*. *r&d Management*, 2003. **33**(4): p. 439-454.
29. Schuh, G., S. Rudolf, and T. Vogels, *Development of Modular Product Architectures*. *Procedia CIRP*, 2014. **20**: p. 120-125.
30. Rajala, R., et al., *The next phase in servitization: transforming integrated solutions into modular solutions*. *International Journal of Operations & Production Management*, 2019.
31. Campagnolo, D. and A. Camuffo, *The concept of modularity in management studies: a literature review*. *International journal of management reviews*, 2010. **12**(3): p. 259-283.
32. Koppenhagen, F., *Modulare Produktarchitekturen–Komplexitätsmanagement in der frühen Phase der Produktentwicklung*, in *Komplexitätsmanagement in Unternehmen*. 2014, Springer. p. 113-162.
33. *Computadora*. [cited 03/03/2020; Available from: <https://es.wikipedia.org/wiki/Computadora>
34. *Post-World War II Prefabricated Aluminum and Steel Houses and Their Relevance Today*. [cited 03/03/2020]; Available from: <https://lynceans.org/tag/airoh-aluminum-house/>
35. *Cómo China ha logrado levantar el hospital del coronavirus de Wuhan en 10 días (y por qué en España somos tan lentos)*. [cited 03/03/2020]; Available from: [https://elpais.com/elpais/2020/02/02/icon\\_design/1580632227\\_180978.html](https://elpais.com/elpais/2020/02/02/icon_design/1580632227_180978.html).
36. *ALTRAN eMOC: la nueva propuesta de Altran hacia la movilidad eléctrica sostenible e inteligente*. [cited 03/03/2020; Available from: <https://www.evwind.com/2012/11/06/altran-emoc-la-nueva-propuesta-de-altran-hacia-la-movilidad-electrica-sostenible-e-inteligente/>.
37. Romero, F. *Plataforma modular CMF de Renault: concebida para albergar tecnologías hasta 2025*. [cited 03/03/2020]; Available from: <https://www.motor.es/noticias/plataforma-cmf-renault-201740299.html>
38. Murias, D. *Volkswagen ID.3: los secretos de la plataforma MEB para coches eléctricos de Volkswagen*. [cited 03/03/2020]; Available from: <https://www.motorpasion.com/industria/volkswagen-id-3-secretos-plataforma-meb-para-coches-electricos-volkswagen>
39. Schuh, G., et al. *Design principles for an integrated product and process development approach for rotationally symmetric products*. in *Proceedings of PICMET'14 Conference: Portland International Center for Management of Engineering and Technology; Infrastructure and Service Integration*. 2014. IEEE.

40. Wiendahl, H.-P. and P. Scholtissek, *Management and control of complexity in manufacturing*. CIRP annals, 1994. **43**(2): p. 533-540.
41. ElMaraghy, H. and T. AlGeddawy, *New dependency model and biological analogy for integrating product design for variety with market requirements*. Journal of Engineering Design, 2012. **23**(10-11): p. 722-745.
42. Jose, A. and M. Tollenaere, *Modular and platform methods for product family design: literature analysis*. Journal of Intelligent manufacturing, 2005. **16**(3): p. 371-390.
43. Allen, K.R. and S. Carlson-Skalak. *Defining product architecture during conceptual design*. in *ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC1998/DTM*. 1998.
44. Zhang, W., S. Tor, and G. Britton, *Managing modularity in product family design with functional modeling*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006. **30**(7-8): p. 579-588.
45. Sinha, K., S.Y. Han, and E.S. Suh, *Design structure matrix-based modularization approach for complex systems with multiple design constraints*. Systems Engineering, 2020. **23**(2): p. 211-220.
46. Kremer, G.E.O. and S. Gupta, *Analysis of modularity implementation methods from an assembly and variety viewpoints*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **66**(9-12): p. 1959-1976.
47. Erixon, G., *Modular function deployment*. 1998: Institutionen för produktionssystem.
48. Lange, M.W. and A. Imsdahl, *Modular function deployment: using module drivers to impart strategies to a product architecture*, in *Advances in product family and product platform design*. 2014, Springer. p. 91-118.
49. Nilsson, P. and G. Erixon, *The chart of modular function deployment*. 1998.
50. Chan, L.-K. and M.-L. Wu, *Quality function deployment: A literature review*. European journal of operational research, 2002. **143**(3): p. 463-497.
51. Hauser, J.R. and D. Clausing, *The house of quality*. 1988.
52. Eppinger, S.D. and T.R. Browning, *Design structure matrix methods and applications*. 2012: MIT press.
53. Li, S., *A matrix-based clustering approach for the decomposition of design problems*. Research in Engineering Design, 2011. **22**(4): p. 263.

54. Li, Z., et al., *An integrated method for flexible platform modular architecture design*. Journal of Engineering Design, 2013. **24**(1): p. 25-44.
55. Sakao, T., W. Song, and J. Matschewsky, *Creating service modules for customising product/service systems by extending DSM*. CIRP annals, 2017. **66**(1): p. 21-24.
56. Browning, T.R., *Design structure matrix extensions and innovations: a survey and new opportunities*. IEEE Transactions on Engineering Management, 2015. **63**(1): p. 27-52.
57. Pimmler, T.U. and S.D. Eppinger, *Integration analysis of product decompositions*. 1994.
58. Blackenfelt, M., *Managing complexity by product modularisation*. 2001, Maskinkonstruktion.
59. Bilalis, N., et al. *Mapping product innovation profile to product development activities-The I-DSM tool*. in *2004 IEEE International Engineering Management Conference (IEEE Cat. No. 04CH37574)*. 2004. IEEE.
60. Geng, X., Y. Jin, and Y. Zhang, *Result-oriented PSS Modular Design Method based on FDSM*. Procedia CIRP, 2019. **83**: p. 610-615.
61. Qiao, L., et al., *Product modular analysis with design structure matrix using a hybrid approach based on MDS and clustering*. Journal of Engineering Design, 2017. **28**(6): p. 433-456.
62. Alexander, C., *Notes on the Synthesis of Form*. Vol. 5. 1964: Harvard University Press.
63. Eppinger, S.D., et al., *A model-based method for organizing tasks in product development*. Research in engineering design, 1994. **6**(1): p. 1-13.
64. Idicula, J., *Planning for concurrent engineering*. Gintic Institute, Singapore, 1995.
65. Gutierrez-Fernandez, C.I., *Integration analysis of product architecture to support effective team co-location*. Massachusetts Institute of Technology, 1998.
66. Thebeau, R.E., *Knowledge management of system interfaces and interactions from product development processes*. 2001, Massachusetts Institute of Technology.
67. Gutierrez, C.I., *Integration analysis of product architecture to support effective team co-location*. 1998, Massachusetts Institute of Technology.

68. Blondel, V.D., et al., *Fast unfolding of communities in large networks*. Journal of statistical mechanics: theory and experiment, 2008. **2008**(10): p. P10008.
69. Yu, T.-L., A.A. Yassine, and D.E. Goldberg, *An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms*. Research in Engineering Design, 2007. **18**(2): p. 91-109.
70. Whitfield, R.I., J.S. Smith, and A.B. Duffy. *Identifying component modules*. in *Artificial Intelligence in Design'02*. 2002. Springer.
71. Helmer, R., A. Yassine, and C. Meier, *Systematic module and interface definition using component design structure matrix*. Journal of Engineering Design, 2010. **21**(6): p. 647-675.
72. Simpson, T.W., et al., *From user requirements to commonality specifications: an integrated approach to product family design*. Research in Engineering Design, 2012. **23**(2): p. 141-153.
73. Ezzat, O., et al. *A DSM Clustering Method for Product and Service Modularization*. in *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. 2019. Springer.
74. Kaur, M. and U. Kaur, *Comparison between K-mean and hierarchical algorithm using query redirection*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 2013. **3**(7).
75. *Dendograma*. 03/03/2020]; Available from: <https://es.wikipedia.org/wiki/Dendograma>
76. 03/03/2020]; Available from: [https://www.unioviado.es/compnum/laboratorios\\_py/kmeans/kmeans.html](https://www.unioviado.es/compnum/laboratorios_py/kmeans/kmeans.html).
77. Kusiak, A. and C.-C. Huang, *Development of modular products*. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1996. **19**(4): p. 523-538.
78. Huang, C.-C. and A. Kusiak, *Modularity in design of products and systems*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1998. **28**(1): p. 66-77.
79. Lee, W.B., et al., *A fuzzy analytic hierarchy process approach in modular product design*. Expert Systems, 2001. **18**(1): p. 32-42.
80. Nepal, B., L. Monplaisir, and N. Singh, *Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase*. International Journal of Production Economics, 2005. **96**(2): p. 157-174.

81. Mattson, C.A. and S.P. Magleby. *The influence of product modularity during concept selection of consumer products*. in *Proceedings of the ASME DETC*. 2001.
82. Sellgren, U. and S. Andersson. *The concept of functional surfaces as carriers of interactive properties*. in *DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15.-18.08. 2005*. 2005.
83. Triplat, I., D. Marjanović, and L. Stamać, *Multi Domain Matrix (MDM) of the Vertical Hydrogenerator*. *Tehnički vjesnik*, 2019. **26**(4): p. 1023-1030.
84. Tamayoa, E.C., et al., *Design of control panels for automated modular construction machines*. *Procedia CIRP*, 2018. **70**: p. 404-409.
85. Bayrak, A.E., et al., *Multiobjective optimization of modular design concepts for a collection of interacting systems*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018. **57**(1): p. 83-94.
86. Holttä, K.M. and M.P. Salonen. *Comparing three different modularity methods*. in *ASME 2003 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*. 2003. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
87. Hölttä-Otto, K., et al., *Comparative analysis of coupling modularity metrics*. *Journal of Engineering Design*, 2012. **23**(10-11): p. 790-806.
88. Guo, F. and J.K. Gershenson. *A comparison of modular product design methods based on improvement and iteration*. in *ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. 2004. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
89. Hölttä-Otto, K., *Modular product platform design*. 2005: Helsinki University of Technology.
90. Stone, R.B., K.L. Wood, and R.H. Crawford, *A heuristic method for identifying modules for product architectures*. *Design studies*, 2000. **21**(1): p. 5-31.
91. Baldwin, C.Y. and C.J. Woodard, *The architecture of platforms: A unified view*. *Platforms, markets and innovation*, 2009. **32**.
92. Mikkola, J.H. *Modularity and interface management: the case of Schindler Elevators*. in *in the proceedings of DRUID Winter Conference*. 2001. Citeseer.
93. Fiorineschi, L. and F. Rotini. *A Preliminary Proposal Towards Unambiguous Definitions for Modular Interfaces and Interactions*. in *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*. 2019. Cambridge University Press.

94. Chung, C. and Q. Peng, *A novel approach to the geometric feasibility analysis for fast assembly tool reasoning*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006. **31**(1-2): p. 125-134.
95. Zhang, J., et al., *Open interface design for product personalization*. CIRP Annals, 2017. **66**(1): p. 173-176.
96. Dufrene, M., P. Zwolinski, and D. Brissaud, *An engineering platform to support a practical integrated eco-design methodology*. CIRP Annals, 2013. **62**(1): p. 131-134.
97. Chen, F., et al., *Design of Open Battery Pack Interface for Electric Vehicle Personalization*, in *Advances in Simulation, Product Design and Development*. 2020, Springer. p. 597-610.
98. Fujita, K., H. Sakaguchi, and S. Akagi. *Product variety deployment and its optimization under modular architecture and module commonalization*. in *Proceedings of the 1999 ASME design engineering technical conferences*. 1999. Citeseer.
99. Fujita, K., *Product variety optimization under modular architecture*. Computer-Aided Design, 2002. **34**(12): p. 953-965.
100. Liu, E. and S.-W. Hsiao, *ANP-GP approach for product variety design*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006. **29**(3-4): p. 216-225.
101. *Multi Criteria Decision Making- TOPSIS EXAMPLE*. 10/05/2020]; Available from: <https://mathewmanoj.wordpress.com/multi-criteria-decision-making/>.
102. Kratzer, S., *Lion's City E Battery Concept*, in AABC. 2020.
103. Manz, H., *The Battery System for Volkswagen's New Electric platform MEB*, in AABC 2020. 2020.
104. Zaversky, M., *Continued limpses into xEV Batteries on the Market*, in AABC. 2018: Mainz.
105. Saw, L.H., Y. Ye, and A.A. Tay, *Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack*. Journal of Cleaner Production, 2016. **113**: p. 1032-1045.
106. Liaw, B.Y. and M. Dubarry, *From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation*. Journal of power sources, 2007. **174**(1): p. 76-88.
107. Patrabooy, T.J., M.D. Farrington, and G.J. Donaldson, *Reliability of lithium batteries in search and rescue beacons*. Journal of power sources, 1997. **65**(1-2): p. 93-99.

108. Arora, S., W. Shen, and A. Kapoor, *Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **60**: p. 1319-1331.
109. Hooper, J.M. and J. Marco, *Characterising the in-vehicle vibration inputs to the high voltage battery of an electric vehicle*. Journal of power sources, 2014. **245**: p. 510-519.
110. Watanabe, K., et al., *Battery structure, assembled battery, and vehicle mounting these thereon*. 2012, Google Patents.
111. Consortium, U., *Electric vehicle battery test procedures manual*. USABC, Jan, 1996, 1996.
112. Al Hallaj, S., et al., *Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries*. Journal of power sources, 1999. **83**(1-2): p. 1-8.
113. Levy, S.C., *Safety and reliability considerations for lithium batteries*. Journal of power sources, 1997. **68**(1): p. 75-77.
114. *Como se apaga el fuego de un coche eléctrico incendiado*. 16/03/2020]; Available from: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/como-se-apaga-el-fuego-de-un-coche-electrico-incendiado>.
115. Pesaran, A.A., G.-H. Kim, and M. Keyser, *Integration issues of cells into battery packs for plug-in and hybrid electric vehicles*. 2009, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
116. Origchi, M., *Renault EV Battery*, in *AABC EUROPE*. 2018.
117. Cadex. *Lithium-ion battery*. 2011 09/03/2020]; Available from: <http://batteryuniversity.com>.
118. R.Konecky, C., *xEV Industry Trends of Charging & Battery Systems*, in *AABC2018*. 2018: Mainz, Germany.
119. Gepp, M., et al. *Advanced thermal management for temperature homogenization in high-power lithium-ion battery systems based on prismatic cells*. in *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. 2015. IEEE.
120. *Nueva tecnología baterías vehículo eléctrico*. Available from: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/nueva-tecnologia-baterias-coches-electricos-audi/20160105194508010634.html>
121. Hermann, W.A., *Rigid cell separator for minimizing thermal runaway propagation within a battery pack*. 2013, Google Patents.
122. Saw, L. and A. Tay. *Thermal modeling and management of Li-ion batteries for electric vehicles*. in *Proceedings of the ASME 2013 international technical conference and exhibition on packaging and integration of electronic and phonic microsystems*. 2013.

123. Kerspe, D., *Multifunctional Battery-Housings and their helpful Application for thermal and mechanical tasks*, in AABC. 2017.
124. Frey, P. and D. Grace, *Battery pack exhaust nozzle utilizing an SMA seal retainer*. 2014, Google Patents.
125. Jritzer, P., *Advanced Sealing Components for Lithium Batteries*, in *aabc europe*, F.S. Technologies, Editor. 2018: Alemania.
126. Higashino, T., K. Saito, and T. Motohashi, *Battery pack with covering member and vehicle with the battery pack*. 2014, Google Patents.
127. Zhou, S., C.C. Husted, and F.A. Benjamin, *Battery pack arrangements*. 2009, Google Patents.
128. Iwasa, M., et al., *Vehicle battery mounting structure*. 2011, Google Patents.
129. Van Schalkwijk, W. and B. Scrosati, *Advances in lithium ion batteries introduction*, in *Advances in Lithium-Ion Batteries*. 2002, Springer. p. 1-5.
130. *Battery Modular Contactos*. 20/05/2020]; Available from: <https://es.rs-online.com/web/p/contactos-de-bateria-modular/1756950/>.
131. *AMP+ HVP 1100 High Voltage Connector System*. 1/05/2020]; Available from: <https://www.te.com/usa-en/products/connectors/automotive-connectors/intersection/amp-hvp-1100-high-current-connectors-and-headers.html?tab=pgp-story>.
132. Amphenol. *Conector para vehículo eléctrico Hembra 2 contactos, Recto, Montaje en Panel, 1000V, 250A, IP67, IP69K* 03/05/2020]; Available from: <https://es.rs-online.com/web/p/conectores-de-vehiculos-electricos/1237560/>.
133. Göllei, A., P. Görbe, and A. Magyar, *Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems*. Journal of Cleaner Production, 2012. **34**: p. 138-145.
134. Hamut, H., I. Dincer, and G. Naterer, *Exergoenvironmental analysis of hybrid electric vehicle thermal management systems*. Journal of Cleaner Production, 2014. **67**: p. 187-196.
135. Pesaran, A.A., *Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions*. Battery Man, 2001. **43**(5): p. 34-49.
136. Thomas Soczka-Guth, A.L., *Cell & module Strategy or low cost powertrains*, in AABC 2018.
137. *High performance battery systems*. 1/06/2020]; Available from: [https://www.akasol.com/library/Downloads/Broschüren/AKASOL\\_bus\\_applications\\_brochure\\_19-2.pdf](https://www.akasol.com/library/Downloads/Broschüren/AKASOL_bus_applications_brochure_19-2.pdf).

138. Poznar, T., *A modular Energy Storage Solution for Transit and Transportation*, in *AABC Europe*. 2018.
139. *STARTECH CABLE ETHERNET 2M UTP AMARILLO CAT5E RJ45*. Available from: <https://www.computerstore.es/cableredutpftp/16294-startechcableethernet2mutpamarillocat5erj45.html>.
140. *Aptiv (formerly Delphi) 54201462* Available from: <https://www.mouser.es/ProductDetail/Aptiv-formerly-Delphi/54201462?qs=%2Fha2pyFaduhp5TrbwoN9v1tPtWgYshVMdmeqhHRyUiU%3D>.
141. *105 - RACOR DE ENTRADA, RECTO ROSCA MACHO BSPT*. Available from: [https://www.legris.com/Legris\\_ecom/RechercherReferencesTypeArticle.do;jsessionid=020D3A6631CB02A669FABCA3264FC9EA?codeActivite=BP&codeGroupe=01&codeFamille=01&codeSousFamille=01&codeTypeArticle=0105&codeFiliale=export&codeLangue=es](https://www.legris.com/Legris_ecom/RechercherReferencesTypeArticle.do;jsessionid=020D3A6631CB02A669FABCA3264FC9EA?codeActivite=BP&codeGroupe=01&codeFamille=01&codeSousFamille=01&codeTypeArticle=0105&codeFiliale=export&codeLangue=es).