



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE UNA BATERÍA PARA UN VEHÍCULO FERROVIARIO. METODOLOGÍA BASADA EN LA TÉCNICA MULTICRITERIO AHP.

AUTORA: MARINA MORENO NICOLÁS

TUTORA: MÓNICA GARCÍA MELÓN

COTUTORA: HANNIA KARIME GONZALEZ URANGO

Curso Académico: 2020-21



RESUMEN

En el presente trabajo se pretende realizar un análisis y selección de baterías para un proyecto de un vehículo ferroviario con el fin de escoger la que mejor se adapta.

Es un proyecto de un tren-tranvía con tracción dual eléctrica. Es una solución de movilidad sostenible que cada vez es más demandada en las ciudades de todo el mundo, ya que se trata de un material rodante menos contaminante, más rápido y eficaz. Para ello, con la ayuda de tres expertos estudiaremos las características más importantes que nos llevan a elegir la mejor batería para este proyecto mediante el uso de la técnica de decisión multicriterio Proceso Analítico Jerárquico (AHP siglas en ingles). Además, también se introducirá porque este cambio sostenible es tan demandado en la sociedad.

El trabajo concluirá con la elección de la mejor batería para el proyecto tren-tranvía de tracción dual eléctrica.

Palabras clave: batería, vehículo ferroviario, multicriterio, AHP



ABSTRACT

In the present project, it is intended to carry out an analysis and selection of batteries for a project of a railway vehicle in order to choose the one that best fits.

It is a project of a train-tram with dual electric traction. A sustainable mobility solution is increasingly in demand in cities around the world, as it is a less polluting, faster and more efficient rolling stock. To do this, with the help of three experts we will study the most important characteristics that lead us to choose the best battery for this project by using the multi-criteria decision technique Analytical Hierarchical Process (AHP). Furthermore, it will also be introduced why this sustainable change is so demanded in society.

The work will conclude with the choice of the best battery for the electric dual traction tram-train project.

Key words: batteries, railway vehicle, multi-criteria, AHP



RESUM

En el present treball es pretén realitzar una anàlisi i selecció de bateries per a un projecte d'un vehicle ferroviari amb la finalitat de triar la que millor s'adapta.

És un projecte d'un tren-tramvia amb tracció dual elèctrica. És una solució de mobilitat sostenible que cada vegada és més demandada a les ciutats de tot el món, ja que es tracta d'un material rodant menys contaminant, més ràpid i eficaç. Per a això, amb l'ajuda de tres experts estudiarem les característiques més importants que ens porten a triar la millor bateria per a aquest projecte mitjançant l'ús de la tècnica de decisió multicriteri Procés Analític Jeràrquic (AHP sigles en engonals). A més, també s'introduirà perquè aquest canvi sostenible és tan demandat en la societat.

El treball conclourà amb l'elecció de la millor bateria per al projecte tren-tramvia de tracció dual elèctrica.

Paraules clau: bateria, vehicle ferroviari, multicriteri, AHP



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
2. ESTADO DEL ARTE	2
2.1. SECTOR FERROVIARIO.....	3
3. PROBLEMA POR ANALIZAR	6
3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
3.2. BATERÍAS.....	6
3.2.1. ORIGEN	6
3.2.2. FUNCIONAMIENTO	7
3.2.3. PARÁMETROS DE LAS BATERÍAS.....	8
3.2.4. TIPO DE BATERÍAS.....	10
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TÉCNICA DE DECISIÓN MULTICRITERIO AHP	13
4.1. PROBLEMA DE DECISIÓN	13
4.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO DE DECISIÓN	13
4.2.1. CONCEPTOS BÁSICOS	14
4.3. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)	15
4.3.1. AXIOMAS BÁSICOS.....	16
4.3.2. PASOS DE LA TÉCNICA AHP	16
5. APLICACIÓN DEL PROCESODE ANÁLISIS JERÁRQUICO.....	21
5.1. PROPUESTA METODOLÓGICA A SEGUIR	22
5.1.1. ETAPA 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
5.1.2. ETAPA 2: SELECCIÓN DE GRUPO DE EXPERTOS.....	22



5.1.3.	ETAPA 3: SELECCIÓN DE CRITERIOS Y ESTRUCTURA DEL MODELO DE DECISIÓN	23
5.1.4.	ETAPA 4: SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	24
5.1.5.	ETAPA 5: PRIORIZACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS MEDIANTE AHP	24
5.1.6.	ETAPA 6: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	25
5.1.7.	ETAPA 7: REDACCIÓN DEL INFORME.....	25
5.2.	PROBLEMA PARA ESTUDIAR: “SELECCIÓN DE UNA BATERIA DE TRACCIÓN PARA UN VEHÍCULO FERROVIARIO”	26
5.2.1.	SELECCIÓN DE GRUPO DE EXPERTOS	26
5.2.2.	SELECCIÓN DE CRITERIOS Y ESTRUCTURA DEL MODELO DE DEISIÓN	26
5.2.3.	SELECCIÓN DE ALTERNTIVAS.....	31
5.2.4.	PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS MEDIANTE AHP.....	35
5.2.5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	59
6.	CONCLUSIONES	62
7.	PRESUPUESTO	64
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	68



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Objetivo de reducción de gases efecto invernadero.....	2
Figura 2 Emisiones de CO2 por pasajero y kilómetro	4
Figura 3 Mapa de la red electrificada y no electrificada	5
Figura 4 Esquema de un sistema electroquímico.....	7
Figura 5 Elementos de una celda.....	8
Figura 6 Diagrama de Ragone.....	9
Figura 7 Esquema de la batería de Ion-Litio	12
Figura 8 Estructura jerárquica en AHP	17
Figura 9 Matriz de decisiones.....	20
Figura 10 Metodología para el desarrollo de la selección basada en AHP	21
Figura 11 Estructura jerárquica	30
Figura 12 Estructura jerárquica de la media geométrica con pesos locales y globales .	55
Figura 13 Resultados de las alternativas agrupados por expertos.....	58
Figura 14 Comparación de resultados finales de cada alternativa agrupadas por expertos	58
Figura 15 Gráfica de soluciones del análisis de sensibilidad	60



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de las baterías de Plomo-Ácido.....	10
Tabla 2 Características de las baterías de Níquel-Cadmio	11
Tabla 3 Características de las baterías de Níquel-Hidruro metálico	11
Tabla 4 Características de las baterías de Ion-Litio	12
Tabla 5 Escala fundamental de comparación propuesta por Saaty (1990).	18
Tabla 6 Índice de consistencia aleatorio según el tamaño de la matriz.....	19
Tabla 7 Vector de prioridad de cada matriz de la matriz de comparaciones pareadas. 19	
Tabla 8 Definición de los criterios	29
Tabla 9 Características de la batería suministrada por ABB.....	31
Tabla 10 Características de la batería suministrada por AKASOL	32
Tabla 11 Características de la batería suministrada por TOSHIBA.....	33
Tabla 12 Normalización de criterios cuantitativos	51
Tabla 13 Pesos locales de los criterios	52
Tabla 14 Pesos de las alternativas	53
Tabla 15 Pesos globales de los criterios	54
Tabla 16 Matriz de decisiones por expertos	57
Tabla 17 Soluciones de las alternativas.....	59



ÍNDICE DE ECUACIONES

(Ecuación 1)	16
(Ecuación 2)	16
(Ecuación 3)	18
(Ecuación 4)	18
(Ecuación 5)	18
(Ecuación 6)	18
(Ecuación 7)	19
(Ecuación 8)	20
(Ecuación 9)	25



1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Este trabajo viene motivado por la necesidad de reducir los gases de efecto invernadero debido al objetivo de descarbonización para 2050. Somos conscientes de la huella de carbono generada por el ser humano y creemos que la tecnología debe crecer respetando el medio ambiente. Ahora, gracias a los avances tecnológicos, nos es cada vez más posible proponer alternativas verdes.

Por ello, vamos a estudiar las diferentes alternativas que hoy en día tenemos a nuestra disposición para cambiar la propulsión del sector ferroviario hacia una tecnología cero emisiones, con el fin de favorecer esta transición. Por otro lado, la razón que me ha llevado a decantarme por el sector ferroviario se debe a haber realizado mis prácticas universitarias en una empresa relacionada con el sector, como es Stadler. Esto ha favorecido positivamente mi motivación, ya que me he visto involucrada en múltiples proyectos de investigación para hacer posible este cambio.

Por último, para la resolución de este proyecto vamos a contar con la metodología AHP, la cual hemos tenido que aprender a utilizar desde cero. Esta metodología nos resulta atractiva porque nos permite estudiar problemas complejos como es la selección de una batería, teniendo en cuenta diferentes puntos de vista y opiniones.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la selección de una batería de tracción para un vehículo ferroviario mediante la metodología AHP. Dentro de este objetivo no solo pretendemos encontrar la solución, sino que también queremos estudiar y dominar la metodología AHP, que como ya hemos mencionado, nos era desconocida hasta la fecha.

El objetivo secundario de este trabajo es realizar un estudio completo de manera profesional y detallada. Pretendemos situarnos en un contexto real y realizar este proyecto con la fiabilidad y responsabilidad que se exigiría en una situación de trabajo concreta.

2. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, se le ha dado importancia a la necesidad de cumplir con el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático. Este acuerdo tiene como objetivo disminuir el aumento de la temperatura mundial. Por eso es necesario una reducción rápida de los gases de efecto invernadero (GEI) con el fin de evitar un cambio climático definitivo.

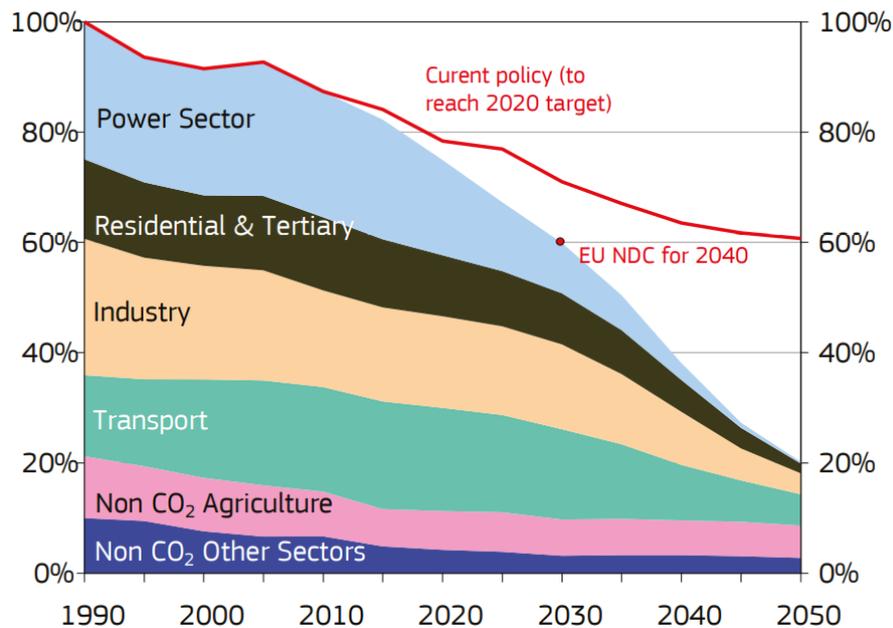


Figura 1 Objetivo de reducción de gases efecto invernadero

Fuente: The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050 [1]

Se espera que para 2050 hayamos reducido las emisiones totales en un 80%. Para que esta reducción sea posible, se ha asignado a todas las economías de la Unión Europea un objetivo. En el sector del transporte no va a ser posible una descarbonización total, pero sí una reducción significativa de un 60% para 2050.

En 2011, la Comisión de la UE publicó “Una hoja de ruta para avanzar hacia una economía competitiva con bajas emisiones de carbono en 2050”, en la que se muestra que es posible una sociedad baja en carbono y para ello se requiere innovación e inversión, concluyendo que este cambio y esfuerzo traerá beneficios. El sector del transporte y el sector de la producción de energía tienen objetivos directos de reducción [2] [1].

En el sector del transporte se están desarrollando e investigando diferentes alternativas para que este objetivo sea posible. Ya se está viendo un gran cambio, y parece que de momento se ha optado por una transición de motores de combustión interna alimentados por combustibles fósiles a la opción de vehículos eléctricos.

Así dicho, parece un avance muy positivo, pero si lo analizamos en profundidad no es una mejora tan sustancial como lo parece.

Los vehículos eléctricos suponen una reducción en la demanda de combustibles fósiles, pero a su vez un consumo más alto de energía eléctrica. Es en este punto, donde nos damos cuenta de que no es tan positivo este avance porque hoy en día, en España las centrales eléctricas de punta son las más contaminantes. Lo que significa una reducción de emisiones en el sector de automoción es un aumento en el sector de generación de energía, aunque en realidad este aumento por la parte de la generación de energía también tiene que ir a menos, ya que la descarbonización es un objetivo común de toda la economía.

2.1. SECTOR FERROVIARIO

Las emisiones de gases de efecto invernadero correspondientes al sector del transporte representan una cuarta parte del total.

Para conseguir cumplir el objetivo de descarbonización en el sector del transporte, la Comisión ha propuesto una serie de medidas:

- Optimizar el uso del transporte y aumentar la eficiencia utilizando soluciones digitales de movilidad, poniendo precios justos y eficientes, así como promover la multimovilidad.
- Incrementar el uso de energías alternativas de bajas emisiones con un marco eficaz, desarrollando la infraestructura necesaria e impermeabilizando y normalizando la movilidad eléctrica.
- Avanzar hacia los vehículos de cero emisiones para recuperar la confianza de los consumidores.

Las alternativas para conseguir una movilidad de cero emisiones difieren según los diferentes tipos de transporte. En el caso del ferrocarril las soluciones pasan directamente por la electrificación [3].

Como se ve en la siguiente figura, el transporte ferroviario es el que menos emisiones de CO₂ emite. Esto se debe a su gran capacidad como transporte colectivo y a las diferentes formas de suministrar la energía que necesitan.

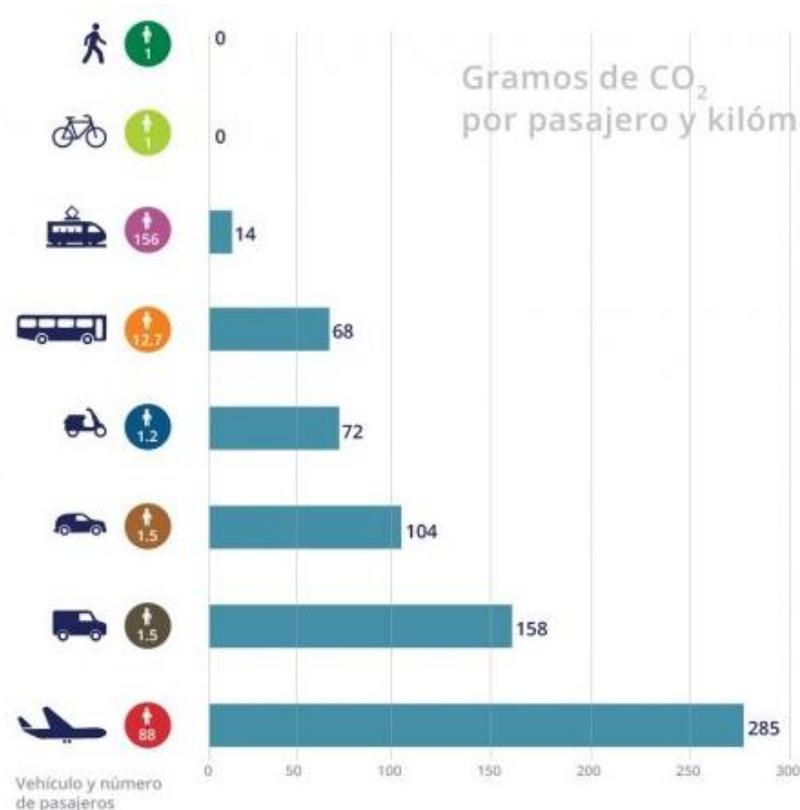


Figura 2 Emisiones de CO₂ por pasajero y kilómetro
Fuente: AEMA [4]

En este sentido, uno de los principales objetivos del sector ferroviario es mejorar su sostenibilidad medioambiental impulsando estrategias para reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia energética.

En muchos casos, la electrificación puede considerarse una de las mejores opciones para lograr este objetivo, porque si la energía proviene de fuentes de energía renovables, la electrificación puede reducir las emisiones contaminantes locales y en ocasiones, las emisiones globales. Sin embargo, debido a razones técnicas o económicas, esta no

siempre es posible. Además, dependiendo de las circunstancias, es necesario evaluar las emisiones generadas durante las obras de electrificación y sopesar si en última instancia son beneficiosas para el medio ambiente.

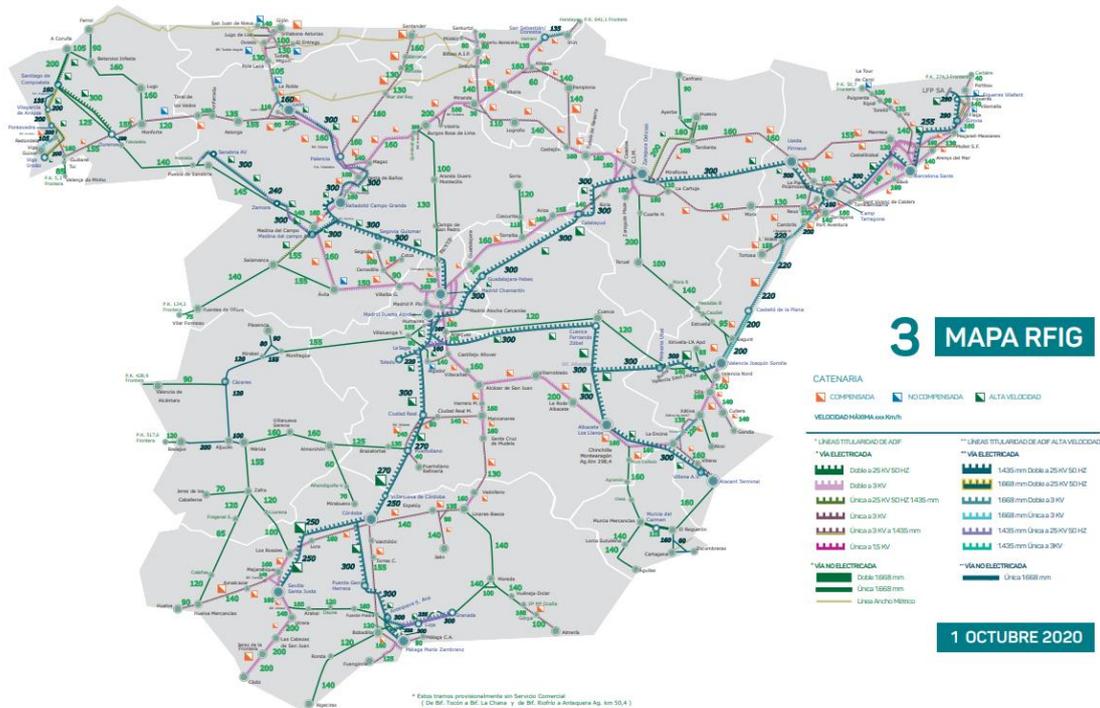


Figura 3 Mapa de la red eléctrica y no eléctrica
Fuente: Adif [5]

Observando la figura anterior las líneas continuas verdes y azules son tramos de vía no electrificadas y las demás son tramos electrificados donde se puede ver el tipo de voltaje. Por esto, es necesario encontrar sistemas alternativos de suministro de energía para las operaciones ferroviarias en líneas no electrificadas.

Aprovechando la infraestructura ya implantada y utilizando de alternativa en los tramos de vías no electrificada el uso de baterías, se puede conseguir una movilidad cerca de ser cero emisiones.

3. PROBLEMA POR ANALIZAR

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema que se va a estudiar corresponde a la selección de una batería de tracción de un vehículo ferroviario. La empresa a la que le concierne esta decisión es Stadler, con sede en Valencia, que se dedica al diseño y producción de vehículos ferroviarios desde hace más de 70 años.

Como se ha comentado anteriormente, está surgiendo la necesidad de un cambio en la propulsión del sector de transporte. Con el objetivo de descarbonización, al sector ferroviario debe reducir sus emisiones en un 0% por lo que están habiendo grandes cambios y se están investigando diferentes alternativas para llegar a cumplir esa meta.

Stadler Valencia ha diseñado su primer tren-tranvía eléctrico dual. Es el primer citylink que estará propulsado por una batería de tracción en los tramos sin catenaria.

3.2. BATERÍAS

3.2.1. ORIGEN

Las baterías se encuentran en nuestras vidas desde el siglo XIX, todo surge a partir del avance de la tecnología electrónica. El creador de esta tecnología fue Alessandro Volta que construyó la primera pila basándose en la tendencia que tienen las cargas eléctricas de pasar de una sustancia a otra cuando se dan unas condiciones específicas.

Alessandro Volta fue un químico y físico italiano conocido por el descubrimiento del metano y la invención de la pila eléctrica.

Hacia 1796 descubrió un desequilibrio eléctrico entre dos materiales distintos al cual llamo “tensión” y esta investigación fue la que le permitió conocer más propiedades, las cuales le llevaron a la fabricación de la primera pila eléctrica. Desde la construcción de la pila eléctrica, Volta se dedicó al estudio de las propiedades estrictamente eléctricas como, la intensidad, conductividad... anticipando grandes avances [6].

3.2.2. FUNCIONAMIENTO

Una batería es un dispositivo que convierte la energía química en energía eléctrica. Su principal objetivo es almacenar energía en forma química para luego liberarla como corriente continua. Existen dos tipos de tecnología:

- **Primaria:** cuando su reacción es irreversible, la batería se ha descargado y ya no puede volver a cargarse.
- **Secundaria:** su reacción electroquímica es reversible, por lo que se puede seguir cargando de corriente continua.

De aquí viene la diferencia entre una pila y una batería, la pila no tiene la opción de almacenar energía, a diferencia de la batería, que sí que puede recargarse [7].

Una batería es el conjunto de dos o más celdas electroquímicas, donde cada una de ellas consta de un electrodo positivo (cátodo) y otro negativo (ánodo) encontrándose ambos separados por una membrana y sumergidos en un electrolito (medio que vincula los electrodos).

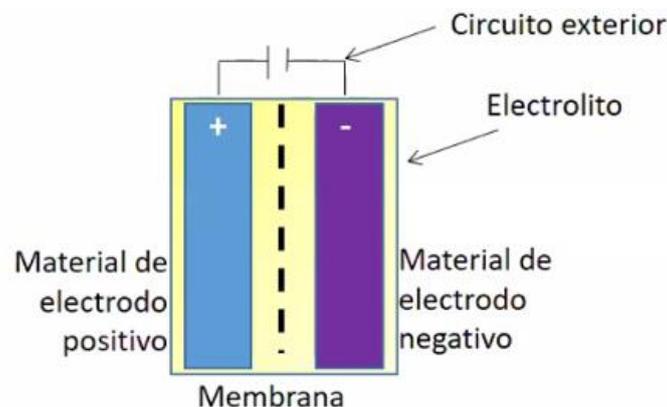


Figura 4 Esquema de un sistema electroquímico
Fuente: CSIC [8]

La disposición de las celdas puede variar dependiendo de la finalidad de la batería. Se pueden colocar en paralelo para conseguir más voltaje o en serie para obtener más corriente.

El funcionamiento se basa en el principio de reducción-oxidación (redox). En la oxidación se combinan sustancias reducidas para formar compuestos más oxidantes perdiendo electrones, mientras que la reducción es el proceso inverso, los reactivos se mezclan para formar sustancias más reducidas absorbiendo electrones, es decir, el que se oxida pierde electrones y el que se reduce gana.

Esto genera un movimiento de electrones produciendo así una corriente eléctrica. Esta corriente eléctrica fluye en sentido contrario al movimiento de los electrones por lo que cuando la batería se está descargando, en el electrodo negativo se produce una reacción de oxidación y en el positivo una reducción. Cuando la batería se está cargando ocurre lo mismo, pero a la inversa.

Estas reacciones no son infinitas, las baterías tienen ciclos (carga-descarga) limitados, ya que el material se va debilitando, haciendo que estas vayan perdiendo capacidad.

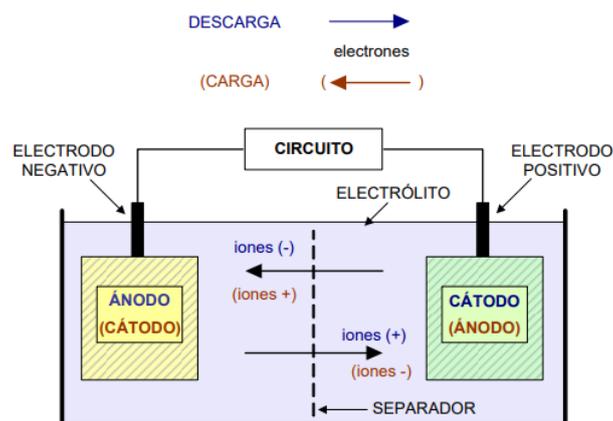


Figura 5 Elementos de una celda
Fuente: [9]

El material de los electrodos tiene que ser semiconductor. Un material semiconductor tiene un comportamiento dual, es conductor y aislante. Según el material de los electrodos y el electrolito se pueden diferenciar los distintos tipos de baterías.

3.2.3. PARÁMETROS DE LAS BATERÍAS

Las baterías se rigen por una serie de parámetros que las definen. Los parámetros que se utilizan son [9]:

- **Tensión, voltaje o fuerza motriz:** es el parámetro más importante en el que fijarse a la hora de decidir qué tipo de batería elegir y este depende de la disposición de las celdas.
- **Capacidad:** es la cantidad de corriente eléctrica que puede suministrar o almacenar una batería, se mide en amperios-hora (Ah). Se diferencia según las condiciones en las que se realiza la medida:
 - **Capacidad nominal:** es la cantidad de corriente que puede entregar una batería a plena carga hasta alcanzar una tensión determinada.
 - **Capacidad real:** es la cantidad de corriente que entrega desde su estado de plena carga hasta una tensión de descarga fijada por unas condiciones dadas diferentes a las de la capacidad nominal. Por esta última razón, la capacidad real puede ser mayor o menos que la nominal.
 - **Capacidad retenida:** capacidad que se conserva tras un periodo de inactividad de la batería.
- **Potencia específica:** la potencia que puede entregar por unidad de peso (W/kg).
- **Energía:** cantidad de energía que puede suministrar, se mide en vatios hora (Wh) y va en función de la tensión, corriente y tiempo.
- **Energía específica:** energía que almacena por unidad de masa (Wh/kg).

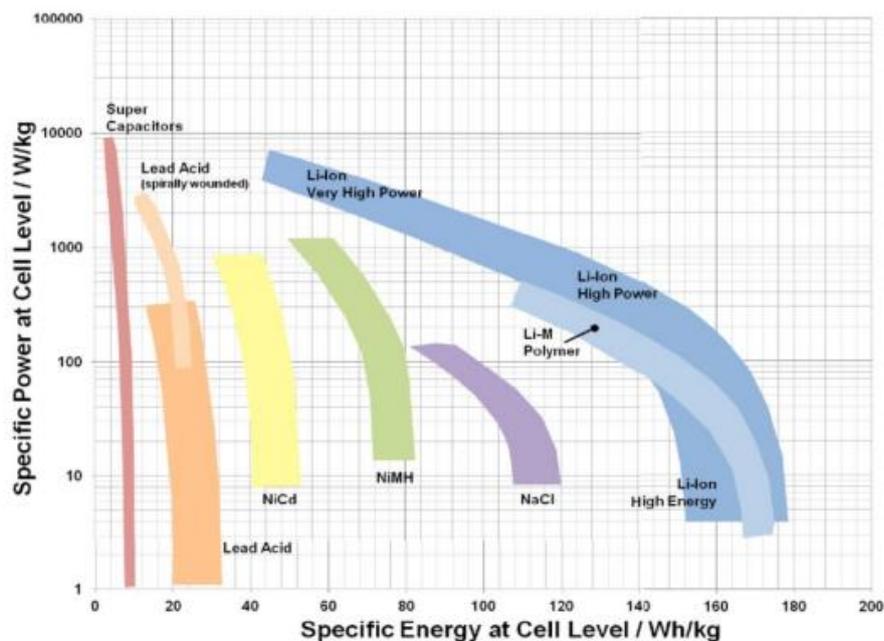


Figura 6 Diagrama de Ragone
Fuente: [10]

- **Vida útil:** tiempo que dura la batería manteniendo sus prestaciones por encima de unos límites mínimos. Relacionado con los ciclos de carga-descarga.
- **Temperatura:** la temperatura es un parámetro importante a tener en cuenta ya que afecta considerablemente al rendimiento de la batería [11].
- **Efecto memoria:** se produce cuando la batería no se descarga completamente tras varias cargas, olvidando su capacidad [12].

3.2.4. TIPO DE BATERÍAS

A continuación, se va hacer una pequeña descripción de los diferentes tipos de baterías que existen en el mercado.

3.2.4.1. BATERÍA DE PLOMO ÁCIDO

Las baterías de Plomo-Ácido son de las primeras baterías recargables inventadas en 1859 por Gastón Planté. Son unas baterías muy desarrolladas tecnológicamente y por ello se usan desde hace años en vehículos de combustión interna como baterías de arranque [9]. Sus características son las siguientes:

	Pb-Ácido
Ánodo	Plomo puro esponjoso (Pb)
Cátodo	Dióxido de plomo (PbO ₂)
Electrolito	Disolución de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)
Energía específica [Wh/kg]	30-50
Potencia específica [W/kg]	180
Densidad energética [Wh/l]	60-110
Eficiencia de carga/descarga	Alta eficiencia 50-95%
Velocidad de auto-descarga	<5%/mes
Durabilidad	500-800 ciclos
Tensión nominal	2V
Temperaturas	-40 - 55°C

Tabla 1 Características de las baterías de Plomo-Ácido
Fuente: Elaboración propia

3.2.4.2. BATERÍA DE NÍQUEL-CADMIO

Las baterías de níquel-cadmio fueron creadas en 1899 en Suecia por Waldmar Jungner. Hasta que no se mejoró la tecnología en 1947 su uso fue muy limitado. Sus características son las siguientes:

	Níquel-Cadmio
Ánodo	Cadmio
Cátodo	Hidróxido de Níquel
Electrolito	Hidróxido de potasio
Energía específica [Wh/kg]	40-80
Potencia específica [W/kg]	150
Densidad energética [Wh/l]	50-150
Eficiencia de carga/descarga	70-90%
Velocidad de auto-descarga	<10%/mes
Durabilidad	>1500 ciclos
Tensión nominal	1,2V
Temperaturas	-40 - 50°C

Tabla 2 Características de las baterías de Níquel-Cadmio
Fuente: Elaboración propia

3.2.4.3. BATERÍA DE NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO

Es una evolución de las baterías de níquel-cadmio. Han sido muy utilizadas, aunque actualmente su uso se ha visto reducido debido a la sustitución de estas por las baterías de Ion-Litio. Sus características son las siguientes:

	Níquel-Hidruro metálico
Ánodo	Aleación de hidruro metálico
Cátodo	Oxihidróxido de Níquel
Electrolito	Hidróxido de potasio
Energía específica [Wh/kg]	60-120
Potencia específica [W/kg]	250-1000
Densidad energética [Wh/l]	140-300
Eficiencia de carga/descarga	50-70%
Velocidad de auto-descarga	15-25%/mes
Durabilidad	1000 ciclos
Tensión nominal	1,2V
Temperaturas	-20 - 50°C

Tabla 3 Características de las baterías de Níquel-Hidruro metálico
Fuente: Elaboración propia

3.2.4.4. BATERÍA DE ION-LITIO

En 1912 surgieron las baterías de litio. En la década de los 70 se intentó desarrollar baterías de Litio recargables, pero, debido a la inestabilidad del metal no consiguieron solucionar los problemas de seguridad por lo que hubo que esperar hasta 1991 para ver la aparición de la primera batería de Ion-Litio recargable [13].

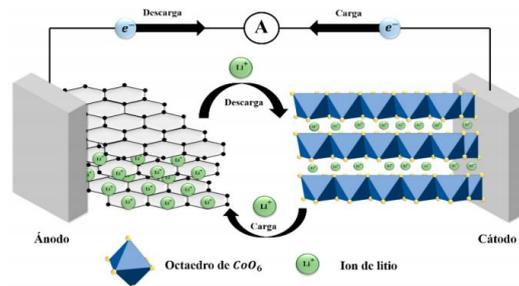


Figura 7 Esquema de la batería de Ion-Litio
Fuente: [14]

Los componentes son óxidos metálicos en el cátodo, un compuesto de carbono para el ánodo y el electrolito son sales de Litio. Sus características son las siguientes:

	Ion-Litio
Ánodo	Grafito
Cátodo	Óxido de litio-metal
Electrolito	Disolución de una sal de Litio
Energía específica [Wh/kg]	75-250
Potencia específica [W/kg]	420
Densidad energética [Wh/l]	300-400
Eficiencia de carga/descarga	80-95%
Velocidad de auto-descarga	<8%/mes
Durabilidad	3500 ciclos
Tensión nominal	3,6V
Temperaturas	-20 – 60 °C

Tabla 4 Características de las baterías de Ion-Litio
Fuente: Elaboración propia

El litio posee un gran potencial electroquímico (comparado con Pb y Ni). Se trata de un material muy ligero, posee una conductividad eléctrica un poco alta, no tiene efecto memoria y están capacitadas para carga rápida.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA TÉCNICA DE DECISIÓN MULTICRITERIO AHP

4.1. PROBLEMA DE DECISIÓN

En toda nuestra existencia, el ser humano ha debido tomar decisiones, desde la más sencilla a la más compleja. Los procesos de toma de decisiones consisten en elegir una alternativa de entre el resto, y es aquí, cuando aparece el conflicto y el decisor se ve afectado por la complejidad de la toma de decisiones. En el caso de proyectos de ingeniería, el hecho de tomar decisiones es una actividad intelectual y de bastante responsabilidad y presente desde el principio hasta el final de todo el proceso.

La toma de decisiones se caracteriza por observar intereses contrapuestos, la existencia de incertidumbre, la involucración de distintas personas con distintos intereses en la decisión y la existencia de elementos fácilmente valorables y elementos difícilmente valorables.

4.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO DE DECISIÓN

El análisis multicriterio de decisiones (MCDA en inglés) nos proporciona una manera sistemática y trazable para la toma de decisiones ayudando a los decisores a aprender sobre el problema teniendo en cuenta los diferentes puntos de vista o criterios que influyen en él.

Por lo tanto, hay que estar dispuesto a recaudar toda la información e invertir tiempo y recursos, hay que valorar el coste de tomar una decisión rigurosa y sistemática frente al coste de tomar una decisión equivocada; la calificación de la toma de decisión no se puede valorar únicamente por los resultados ya que debe conocer el procedimiento y, por último, en la decisión se puede fracasar o tener éxito dependiendo sobre todo de cómo se adoptó la decisión elegida [15] [16].

4.2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

- **Problema:** se presenta un conjunto finito de alternativas en un determinado contexto de decisión donde uno o varios decisores han de seleccionar la mejor alternativa o bien ordenarlas de mejor a peor, teniendo en cuenta los diferentes criterios o puntos de vista del conflicto.
- **Decisor:** persona o personas implicadas que son responsables de la toma de decisión.
- **Objetivos:** se analizan como algo importante que se quiere alcanzar tras tomar una decisión. Recomendaciones para establecer objetivos:
 - Anotar todo lo que se espera solucionar (hacer una lista de deseos, pensar el peor resultado, considerar como afectaría la decisión, hablar con personas que hayan pasado ya por esta situación...).
 - Convertir las inquietudes en objetivos sintéticos.
 - Separar los medios de los fines al formular.
 - Aclara que significa cada objetivo.
 - Poner a prueba los objetivos para ver si captan los intereses.
- **Conjunto de alternativas:** son todas las posibles soluciones que se pueden tomar. Deben ser comparables entre ellas.
- **Atributos:** son las características tanto cuantitativas, peso, dimensiones y precio, como a veces cualitativas, modos de funcionamiento, etc. Son características independientes de los juicios de los decisores.
- **Criterios de evaluación:** son todos los atributos y objetivos del problema; suelen ser un número finito y cuantifican el nivel de logro de los objetivos.
- **Peso o preferencia:** importancia que le da el decisor a un criterio o alternativa.

4.3. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

La metodología AHP fue creado por el profesor Thomas L. Saaty a finales de los años 70. Según Thomas L. Saaty es una teoría de la medida relativa de criterios intangibles (cuantitativos/cualitativos).

Se basa en la idea de poder resolver un problema bastante complejo con múltiples criterios estructurándolos jerárquicamente. En cada nivel de jerarquía, se comparan de forma pareada, según su importancia otorgada. Estas comparaciones nos van a servir para construir una función con las preferencias del decisor en una escala numérica y universal que sirva para todos los decisores; esta función se llama función de utilidad.

Las comparaciones pueden ser por:

- Ratios de preferencia: si se comparan alternativas.
- Ratios de importancia: si se comparan criterios.

El método permite analizar el nivel de inconsistencia de los juicios del decisor, es decir, si el decisor ha emitido su juicio de manera consistente o no.

AHP es un método que consigue medir la subjetividad del decisor a la hora de establecer juicios o preferencias. Aunque los criterios tengan medidas físicas, su valoración depende del significado que tenga esa medida para el decisor, ya que no podemos etiquetar ninguna medida física sin saber en qué contexto se hace, con qué propósito y con qué otros objetivos lo estamos comparando. Por ello, es tan importante la valoración subjetiva del decisor, ya que se está viendo en esa medida el significado para este en una situación dada. Estas medidas sí que pueden ser objetivas.

Este proceso de comparaciones pareadas facilita la complejidad del reparto de pesos entre muchas alternativas, ya que hacer un reparto entre dos es fácil, pero entre 20 hay que empezar a iterar. [17] [18]

4.3.1. AXIOMAS BÁSICOS

A continuación, se presentan los diferentes axiomas básicos de la técnica:

- **Comparación recíproca:** al realizar comparaciones pareadas la intensidad de esta preferencia debe ser recíproca. Es decir, si A es x veces preferido sobre B, B tiene que ser 1/x preferido sobre A

$$r_{ij} \cdot r_{ji} = 1 \quad (\text{Ecuación 1})$$

- **Homogeneidad:** los elementos deben ser comparables y las preferencias tienen una escala de comparabilidad limitada.

$$r_{ij} = 1 \quad (\text{Ecuación 2})$$

- **Independencia:** una vez expresadas las preferencias, cuando se valoran los criterios, estos deben ser independientes de las propiedades de las alternativas.
- **Axioma de las expectativas:** la jerarquía debe ser completa.

4.3.2. PASOS DE LA TÉCNICA AHP

En los siguientes puntos se muestran los diferentes pasos a seguir para resolver un problema a través de la metodología AHP. [19] [20] [21]

4.3.2.1. PASO1: DESARROLLO DE UN MODELO DE DECISIÓN

El primer paso es uno de los más complejos. Este consiste en escoger los factores que son importantes para la decisión estructurándolos de forma jerárquica. Para ello se necesita comprender y desgranar todo el problema.

Los criterios se organizan por grupos, pudiendo estos dividirse en otros subgrupos. Los criterios deben cumplir los axiomas básicos de la técnica. Además, una buena estructura jerárquica optimiza la solución.

En el primer nivel de la jerarquía, se encuentra el objetivo, le siguen los criterios, pudiendo estos dividirse en subniveles, y en el último nivel, figuran las diferentes alternativas. La finalidad es crear una estructura general que pueda servir para otros problemas de decisión como este ya que tiene una visión global de todo el problema.

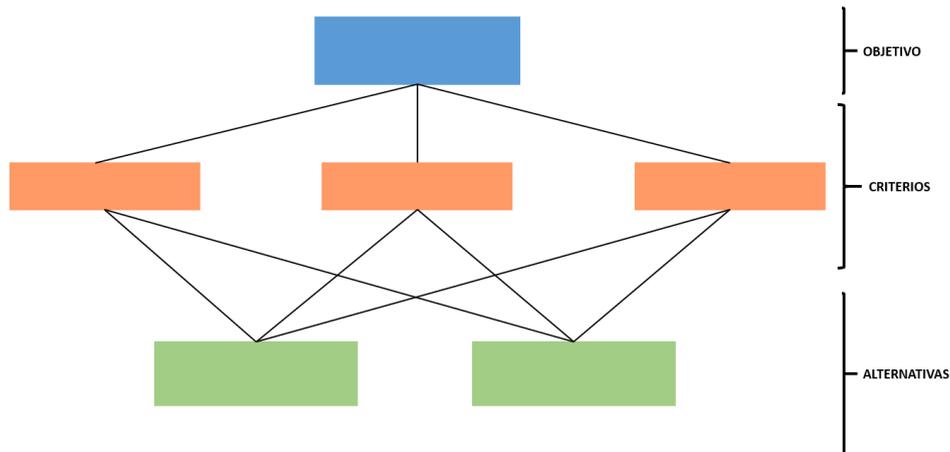


Figura 8 Estructura jerárquica en AHP
Fuente: Elaboración propia

La selección de los criterios de decisión es un paso fundamental para la selección de la alternativa más adecuada.

4.3.2.2. PASO2: ESTABLECIMIENTO DE PRIORIDADES PARA CADA CRITERIO

El objetivo del segundo paso, es obtener el vector de pesos de los criterios o alternativas. Existen dos formas de realizarlo:

- **Asignación directa:** se suele utilizar con criterios que son cuantitativos estableciendo una escala de medida o ponderando las características numéricas sobre el total de todos los criterios.
- **Asignación indirecta:** se realiza a través de un cuestionario de comparaciones pareadas en el que el decisor muestra sus preferencias sobre cada criterio o alternativa. Es un método mucho más complejo.

Los decisores muestran sus preferencias de unos criterios o unas alternativas “i” frente a otros criterios u otras alternativas “j” del mismo nivel jerárquico en la forma de comparaciones pares. Las preferencias se valoran a través de una escala fundamental de comparación. Esta consiste en la transformación del sistema de preferencias del decisor a una escala numérica y universal que sirve para todos los decisores.

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
1	Igual de importante	Las dos actividades contribuyen por igual al objetivo.
3	Importancia moderada de un elemento sobre el otro	La experiencia y el razonamiento están a favor de uno sobre otro.
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro	La experiencia y el razonamiento están fuertemente a favor de uno sobre otro.
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento domina sobre el otro.
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro	Favorece una actividad sobre la otra en un nivel lo más alto posible.
2,4,6,8	Valores intermedios para matizar	

Tabla 5 Escala fundamental de comparación propuesta por Saaty (1990).

El número de comparaciones que hay que hacer sigue la ecuación 3 donde “n” es el número de criterios o número de alternativas.

$$\frac{n(n-1)}{2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Para una fácil representación de las comparaciones se debe montar la matriz de comparaciones pareadas.

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Con esta matriz trabajamos los pesos proporcionados por el decisor o decisores cumpliendo las propiedades de homogeneidad, de reciprocidad y de transitividad donde $r_{ij} \cdot r_{jk} = r_{ik}$. De manera que, la primera fila corresponde a la comparación del criterio o alternativa 1 con los criterios o alternativas 2 y 3, y así, sucesivamente con el resto de filas. Por lo que, la diagonal será unitaria y los valores por debajo de ella serán los inversos a los que encontramos por encima, por ejemplo:

$$r_{21} = \frac{1}{r_{12}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Una vez montada la matriz, hay que comprobar si hay juicios contradictorios, es decir, se debe medir la consistencia de los juicios expresados por el decisor. Dicha consistencia se comprueba a través del ratio de consistencia, “CR”, siguiendo la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Ecuación 6})$$

En esta, “CI” es el índice de consistencia que sigue la ecuación 7 siendo “ λ_{max} ” el valor propio máximo de la matriz y “n” el tamaño de la matriz.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Ecuación 7})$$

“RI” es el índice de consistencia aleatorio, un valor fijo que sigue la siguiente tabla dependiendo del tamaño de la matriz.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484

Tabla 6 Índice de consistencia aleatorio según el tamaño de la matriz

Saaty define que una matriz es consistente cuando para n=3 CR<0.05, para n=4 CR<0.08 y para n>4 CR<0.1.

Una vez obtenidas las matrices de comparación de paridad de los diferentes niveles, procedemos a sacar el vector de prioridades (pesos) mediante dos métodos:

MATRIZ R	C1	C2	C3	VECTOR DE PRIORIDAD
C1	1	r_{12}	r_{13}	w_1
C2	r_{21}	1	r_{23}	w_2
C3	r_{31}	r_{32}	1	w_3

Tabla 7 Vector de prioridad de cada matriz de la matriz de comparaciones pareadas
Fuente: Elaboración propia

Existen dos métodos a la hora de obtener el vector de prioridades:

- **Método de la media geométrica:** 1. Multiplicar los “n” elementos de cada fila de la matriz R, 2. Obtener la raíz n-ésima de cada producto y 3. Normalizar el vector obtenido.
- **Método exacto:** a) se eleva la matriz al cuadrado, se suman los valores de cada fila y se normalizan, b) se resta el vector obtenido por el mismo procedimiento en la matriz original y c) si la diferencia es un valor alto, se calcula la tercera potencia de la matriz y así sucesivamente hasta que las diferencias de los valores obtenidos sean despreciables.

4.3.2.3. PASO 3: CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIÓN

En este paso transformamos los pesos locales de los criterios y subcriterios en pesos globales quedando toda la estructura jerárquica ponderada respecto al objetivo.

Respecto a los pesos de las alternativas, no es necesario sacar los pesos globales, ya que estas quedan ponderadas respecto al último nivel de criterios. Estos pesos se introducen directamente en la matriz de decisión para la construcción de la matriz de decisión.

Finalmente, habiendo obtenido los pesos globales de los criterios y subcriterios (w) y los pesos de las alternativas (r), montamos la matriz de decisión de la siguiente forma para poder decidir cuál es la mejor alternativa.

	C_1	C_2	...	C_j	C_n
PESOS	W_1	W_2	...	W_j	W_n
A_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1j}	r_{1n}
A_2	r_{21}	r_{22}	...	r_{2j}	r_{2n}
A_3	r_{31}	r_{32}	...	r_{3j}	r_{3n}

Figura 9 Matriz de decisiones
Fuente: Elaboración propia

4.3.2.4. PASO 4: CÁLCULO DE LAS PRIORIDADES GLOBALES DE CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS

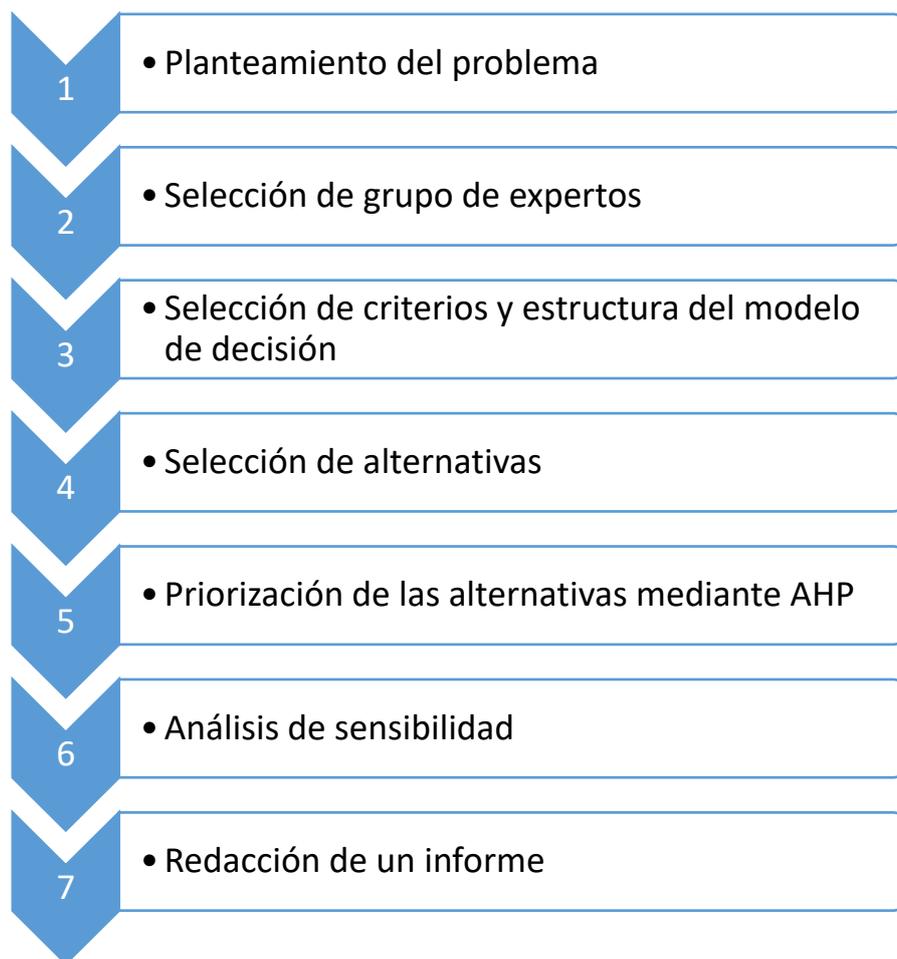
Se va a proceder al cálculo de la agregación de las prioridades globales de las alternativas por suma ponderada de las prioridades obtenidas de cada nivel.

En definitiva, el cálculo de las prioridades globales de las alternativas sigue la siguiente ecuación:

$$p_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot r_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{Ecuación 8})$$

5. APLICACIÓN DEL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

En este apartado se va a explicar paso a paso que etapas se van a seguir y como se ha aplicado el proceso analítico jerárquico, AHP, para el caso de estudio. Anteriormente se ha descrito el planteamiento del problema y se ha realizado una explicación sobre los sistemas de baterías y la metodología que se va a implementar.



*Figura 10 Metodología para el desarrollo de la selección basada en AHP
Fuente: Elaboración propia*

5.1. PROPUESTA METODOLÓGICA A SEGUIR

5.1.1. ETAPA 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se explicó anteriormente, el problema consiste en seleccionar una batería para un vehículo ferroviario, en este caso, un nuevo tren-tranvía de tracción dual eléctrica. El problema se resolverá a través de la metodología multicriterio AHP, contando con la ayuda de varios expertos.

Antes de ponerse a realizar la técnica de decisión multicriterio hay que investigar y recopilar toda la información necesaria para la resolución del problema. En general, hay que tener una visión global del problema que se pretende abordar.

5.1.2. ETAPA 2: SELECCIÓN DE GRUPO DE EXPERTOS

Esta toma de decisión debe contar con la colaboración de un grupo de expertos. La selección de la batería no puede basarse en la decisión de un solo individuo. Se va a contar con un grupo de expertos en la rama eléctrica y con personas que lideran el proyecto. Así se llegará a una solución que tiene en cuenta los diferentes puntos de vista o criterios que realmente influyen en el problema.

La toma de decisiones grupales tiene muchas ventajas a la hora de que la decisión final está más argumentada y ha tenido en cuenta un mayor número de opiniones. Según Saaty, los Stakeholders son personas, grupos u organizaciones que mantienen un vínculo directo o indirecto con la empresa y en consecuencia, pueden afectarles las decisiones y acciones de esta, y que recíprocamente pueden influir o ejercer poder sobre dicha empresa. Por ello, la selección de los integrantes del grupo o Stakeholders es un aspecto clave, ya que de él dependerán los resultados del proceso y del nivel de satisfacción de la toma de decisión. Es necesario que todos los integrantes conozcan la metodología y el objetivo global del problema para que comprendan el proceso que se está llevando a cabo. [22]

5.1.3. ETAPA 3: SELECCIÓN DE CRITERIOS Y ESTRUCTURA DEL MODELO DE DECISIÓN

Es una de las etapas más importante y difícil, ya que en base a ella se realizará toda la metodología para llegar a una decisión final. Hay que conocer el problema y a partir de ahí, con la ayuda de los Stakeholders, seleccionar las características y criterios importantes para la toma de decisión. Además, después de haber seleccionado los criterios, hay que organizarlos y estructurarlos jerárquicamente. Una correcta selección y estructuración de criterios optimiza y facilita la decisión final.

Con la ayuda de los Stakeholders y su conocimiento sobre el problema seleccionado, el primer listado de criterios, para el caso de estudio, es el siguiente:

Criterios técnicos:

- Material
- Ciclos de vida
- Voltaje nominal
- Capacidad nominal
- Energía
- Capacidad de carga-descarga
 - Capacidad de carga
 - Capacidad de descarga

Criterios físicos:

- Dimensiones
- Peso
 - Baterías
 - Total (Baterías + cooling)
- Condiciones de funcionamiento
 - Temperatura Máxima
 - Temperatura Mínima
- Material recubierta
- Montaje
- Protección fuego
- Refrigeración

Criterios suministradores:

- Relación con el suministrador
- Reciclaje
- Mantenimiento
- Prestaciones
 - Diseño personalizado
 - Diseño predeterminado

Criterios económicos:

- Coste económico
- Financiación
- Coste de mantenimiento
- Coste de reparación
- Garantía

Hasta ahora todas las etapas han consistido en la recopilación y organización de la información que corresponde al Proceso de Análisis.

5.1.4. ETAPA 4: SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Se recopilarán las diferentes alternativas que existen, para analizar todas las características/criterios de cada una de ellas. La selección de alternativas debe cumplir más o menos los criterios seleccionados en la etapa anterior, además, deben ser comparables entre ellas.

5.1.5. ETAPA 5: PRIORIZACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS MEDIANTE AHP

Teniendo clara la estructura jerárquica y conociendo las características de las alternativas seleccionadas, nuestro siguiente paso es evaluar los criterios y las alternativas mediante un cuestionario por comparaciones pareadas, con el objetivo de conocer el vector de pesos de cada criterio y alternativa. En cuanto a los criterios cuantitativos, hemos decidido evaluarlos mediante su normalización mediante asignación directa.

Para la obtención de los pesos, se decide realizar el método de agregación de juicios individuales por media geométrica. La media geométrica se obtiene del conjunto de juicios de los tres expertos que han participado en el cuestionario, considerándose esta un cuarto experto más. Este procedimiento nos permite analizar el problema según las preferencias de cada experto y también de forma global.

Una vez obtenidos los pesos locales, procedemos a calcular los pesos globales de cada criterio y, junto a los pesos obtenidos de las alternativas y la normalización de los criterios cuantitativos, montamos la matriz de decisión.

Con la matriz de decisiones, sacaremos el valor total de cada alternativa, bien, multiplicando cada vector de pesos de las alternativas por el peso global de cada criterio, o bien multiplicando los valores normalizados de los criterios cuantitativos por el peso global de cada criterio. Para finalmente sumarlos todos ellos.

$$A_1 = \sum PG_{cx} * VP_x \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde “PG_{cx}” es el peso global de criterio x y “VP_x” es el vector de pesos obtenido de la valoración de la alternativa o de la normalización de los criterios cuantitativos.

5.1.6. ETAPA 6: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En esta etapa se comprueba que la solución es correcta realizando un análisis de sensibilidad. Este análisis consiste en la variación de un peso repartiéndolo equitativamente entre los demás del mismo nivel para analizar si la solución observando como varía el resultado respecto el obtenido en primera instancia.

Esto permite analizar el problema más profundamente sacando conclusiones más complejas.

5.1.7. ETAPA 7: REDACCIÓN DEL INFORME

Una vez obtenida la solución se redactará un informe como justificante de la selección obtenida donde se podrá ver todos los pasos y aclaraciones del proceso hasta llegar a la solución. Se analizarán todos los resultados importantes obtenidos.

5.2. PROBLEMA PARA ESTUDIAR: “SELECCIÓN DE UNA BATERIA DE TRACCIÓN PARA UN VEHÍCULO FERROVIARIO”

En este apartado se va a explicar paso a paso como se ha resuelto el problema de estudio a través del proceso analítico jerárquico, AHP, para el caso de estudio.

5.2.1. SELECCIÓN DE GRUPO DE EXPERTOS

Para poder realizar el estudio necesitamos contar con la ayuda de un grupo de expertos en el ámbito del sector ferroviario. En este caso se ha procurado contar con gente que está participando en el proyecto, tanto del departamento de eléctricos, que conocen técnicamente los sistemas de baterías, como expertos que están liderando el proyecto en su totalidad.

Los expertos son los siguientes:

- Experto 1: Responsable Técnico de Proyectos del grupo Concept Design de Stadler.
- Experto 2: Jefe del grupo de “Traction & Safety Systems” de Stadler.
- Experto 3: Jefe del grupo de “Tender & Vehicle Concept” de Stadler.

Lamentablemente, no se ha podido contar con la colaboración de más expertos, aun así es un número adecuado para la resolución de la toma de decisión.

5.2.2. SELECCIÓN DE CRITERIOS Y ESTRUCTURA DEL MODELO DE DEISIÓN

La selección y estructuración es un proceso complejo. Para este trabajo, la recopilación de criterios ha sido compleja ya que es una tecnología que está en vías de desarrollo. Además, para la estructuración se ha tenido que diferenciar entre criterios cualitativos, criterios cuantitativos y características de las alternativas seleccionadas.

Se va a proceder a hacer una breve descripción de cada criterio, exponiendo sus unidades y si estos son a maximizar o minimizar.

CRITERIO	SUBCRITERIOS	DEFINICIÓN	UNIDAD	DIRECCIÓN DE LA PREFERENCIA
Material		Tipo de material usado para el ánodo y el cátodo. Define el tipo de batería que es.	Ion-litio. Ion- oxido de litio, níquel, magnesio y cobalto (NMC). Ion-oxido de litio y titanio.	Comparaciones pareadas por alternativas
Ciclos de vida		Un ciclo implica una carga y descarga completa de la batería. Con esto se mide la vida útil del producto, cuantas veces se puede cargar y descargar manteniendo sus prestaciones dentro de un rango.	Ciclos	A maximizar
Voltaje nominal		Tensión que se espera tener en unas condiciones estándares.	Voltios [VDC]	A maximizar
Capacidad nominal		Es la cantidad de corriente que puede entregar hasta un determinado voltaje.	Amperios hora [Ah]	A maximizar
Energía		Cantidad de energía que puede suministrar la batería y depende de la tensión, corriente y tiempo.	Kilovatios hora [kWh]	A maximizar
Capacidad de carga-descarga	Capacidad de carga	Cantidad de corriente que puede dar en un tiempo determinado	Kilovatios cada diez segundos [kW/10s]	A maximizar
	Capacidad de descarga	Cantidad de corriente que puede recibir en un tiempo determinado.	Kilovatios cada diez segundos [kW/10s]	A maximizar
Dimensiones		Espacio que ocupará la batería en el tren-tranvía.	Milímetros [mm ³]	A minimizar: Se requiere utilizar el menos espacio posible.

Peso	Batería	Está el peso de las baterías y el peso total que incluye el cooling (parte de refrigeración). Hay requerimientos de pesos, por lo que el tren-tranvía debe estar dentro de unos límites.	Kilogramos [kg]	A minimizar: Siempre se suele ir justo en el requisito de pesos.
	Total			
Condiciones de funcionamiento	Temperatura máxima	Está la temperatura máxima y la temperatura mínima del rango de operación. Dependen de las condiciones ambientales de la zona donde vaya a rodar el tren-tranvía.	Grados centígrados [°C]	A maximizar: lo mejor es un mayor rango de temperaturas.
	Temperatura mínima			
Material recubierta		Material de la carcasa	Acero inoxidable. Recubrimiento de aluminio.	Comparaciones pareadas por alternativas
Montaje		La disposición de la batería es importante debido a la distribución de pesos y cableado.	Sobre cubierta. Bajo bastidor.	<u>Criterio descartado</u> : ya que todas las alternativas tienen las mismas características.
Protección fuego		Debido al material de las baterías y las condiciones medioambientales, hay que cumplir unos requisitos de seguridad y protección contra incendios (norma EN 45545).	Detección de fuego. Extinción de fuego.	<u>Criterio descartado</u> : ya que todas las alternativas tienen las mismas características.
Refrigeración		La batería tiene que ser refrigerada, ya que en funcionamiento se sobrecalienta.	Líquido refrigerante Aire forzado	Comparaciones pareadas por alternativas

Relación con el suministrador		Relación que tiene la empresa con los suministradores.	ABB AKASOL TOSHIBA	Comparaciones pareadas por alternativas
Reciclaje		Si el suministrador se hace cargo del reciclaje o no.	Suministrador se hace cargo del reciclaje. Suministrador no se hace cargo del reciclaje.	<u>Criterio descartado</u> : ya que todas las alternativas tienen las mismas características.
Mantenimiento		Algunas baterías requieren de revisiones periódicas para verificar el buen estado de la batería.	Requerimiento de mantenimiento. No requerimiento de mantenimiento.	Comparaciones pareadas por alternativas
Prestaciones		El suministrador puede tener la opción de diseñarte la batería a medida según tu espacio.	Diseño predeterminado. Diseño personalizado.	Comparaciones pareadas por alternativas
Coste económico		El precio de la batería	Euros [€]	A minimizar
Financiación		Si los suministradores tienen la opción de ayudarte a la hora de realizar el pago.	Euros [€]	<u>Criterio descartado</u> : en esta empresa no tiene relevancia.
Coste de reparación		Cuanto puede costar reparar la batería en caso de avería.	Euros [€]	<u>Criterio descartado</u> : tras haber analizado las alternativas el criterio ha sido descartado.
Garantía		Si hay un seguro por fallo de fabricación.	Hay garantía No hay garantía	Comparaciones pareadas por alternativas

Tabla 8 Definición de los criterios
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra como ha quedado la estructura jerárquica:

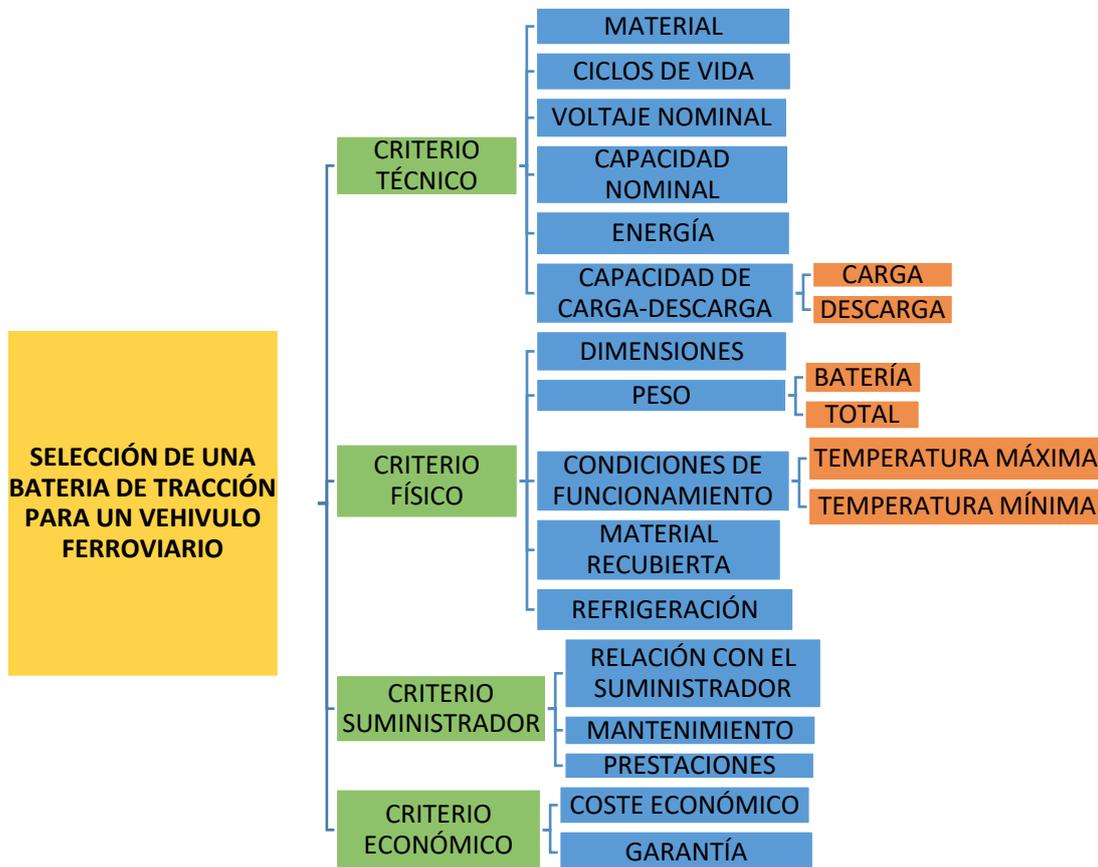


Figura 11 Estructura jerárquica
 Fuente: Elaboración propia

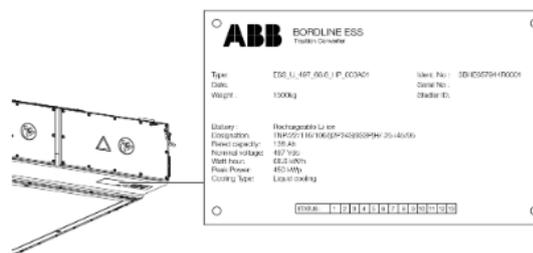
La finalidad de la jerarquía es que pueda servir como modelo para otros casos de estudio sobre baterías de tracción para vehículos ferroviarios. Por ello, se ha tenido que discernir entre criterios cualitativos y características de las alternativas, ya que para crear subniveles de subcriterios se tiene que valorar todas las opciones posibles que tiene el criterio del nivel padre.

5.2.3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Se presentan las diferentes alternativas con sus respectivas características que se van a tener en cuenta para la toma de decisión final.

Las baterías de tracción para la propulsión de vehículos ferroviarios debido su novedosa utilización ha provoca que haya un abanico de soluciones reducido, dejando pocas alternativas en el mercado.

- Alternativa 1: **ABB**



CRITERIOS	DATOS
Material	ion-litio
Ciclos	10000
Voltaje nominal	497 VDC
Capacidad nominal	138 Ah
Energía	69 kWh
Capacidad de carga-descarga	73,4/150 kW/10s
Dimensiones del aparato (L x W x H)	2056 x 1686 x500 mm
Peso batería [kg]	1500
Cooling [kg]	195
Peso total [kg]	1695
Temperatura ambiente de operación	-25.....+40 °C
Material cubierta	Recubrimiento de aluminio
Montaje	Bajo bastidor-Sobre cubierta
Protección de fuego	SI detección NO extinción
Refrigeración	Líquido refrigerante
Vehicle control (TCU)	CANopen
BTMS Controller	CANopen
Tipo de protección	IP65
Reciclaje	NO
Mantenimiento	SI
Prestaciones	SI
Financiación	NO
Garantía	SI

Tabla 9 Características de la batería suministrada por ABB
Fuente: Elaboración propia

- Alternativa 2: **AKASOL**



AKASYSTEM



CRITERIOS	DATOS
Material	ion-Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC)
Ciclos	>7000
Voltaje nominal	799 VDC
Capacidad nominal	92 Ah
Energía	73.6 kWh
Capacidad de carga-descarga	184/334 kW/10s
Dimensiones del aparato (L x W x H)	3688 x 1500 x 432 mm
Peso batería [kg]	1600
Cooling [kg]	120
Peso total [kg]	1720
Temperatura ambiente de operación	-15.....+55 °C
Material cubierta	Acero inoxidable
Montaje	Bajo bastidor-Sobre cubierta
Protección de fuego	SI detección NO extinción
Refrigeración	Líquido refrigerante
Vehicle control (TCU)	CAN bus
BTMS Controller	CAN bus
Tipo de protección	IP67
Reciclaje	NO
Mantenimiento	NO
Prestaciones	SI
Financiación	NO
Garantía	NO

Tabla 10 Características de la batería suministrada por AKASOL

Fuente: Elaboración propia

- Alternativa 3: **TOSHIBA**



CRITERIOS	DATOS
Material	ion-Óxido de litio y titanio
Ciclos	10000
Voltaje nominal	500 VDC
Capacidad nominal	60 Ah
Energía	164.65 kWh
Capacidad de carga-descarga	30/120 kW/10s
Dimensiones del aparato (L x W x H)	1900 x 2300 x 545 mm
Peso batería [kg]	1850
Cooling [kg]	0
Peso total [kg]	1850
Temperatura ambiente de operación	-30.....+55
Material cubierta	Acero inoxidable
Montaje	Bajo bastidor-Sobre cubierta
Protección de fuego	SI detección NO extinción
Refrigeración	Aire forzado
Reciclaje	NO
Mantenimiento	NO
Prestaciones	NO
Financiación	NO
Garantía	SI

Tabla 11 Características de la batería suministrada por TOSHIBA

Fuente: Elaboración propia

Además, debido a la competencia de mercado y la necesidad de las empresas suministradoras de sacar la batería con mejores prestaciones, el acceso a la información técnica es complejo. Aun así, se ha contado con la ayuda de Stadler, proporcionando acceso a una mayor cantidad de información.

A partir de ahora se va a hacer referencia a los criterios por las siguientes siglas:

Criterios técnicos (CT):

- Material (M)
- Ciclos (CV)
- Voltaje nominal (VN)
- Capacidad nominal (CN)
- Energía (E)
- Capacidad de carga (CC)
- Capacidad de descarga (CD)

Criterios físicos (CF):

- Dimensiones. Longitud (L)
- Dimensiones. Ancho (W)
- Dimensiones. Alto (H)
- Dimensiones. Área total (D)
- Peso de las baterías (B)
- Peso total (T)
- Condiciones de funcionamiento. Temperatura máxima (TMax)
- Condiciones de funcionamiento. Temperatura mínima (TMin)
- Material de la recubierta. Recubrimiento de aluminio (RA)
- Material de la recubierta. Acero inoxidable (AI)
- Refrigeración. Líquido refrigerante (LR):
- Refrigeración. Aire forzado (AF):

Criterios suministrador (CS):

- Relación con el suministrador (RS):
- Mantenimiento (M):
- Prestaciones. Diseño predeterminado (DC):
- Prestaciones. Diseño personalizado (DP):

Criterios económicos (CE)

- Coste económico del producto (C):
- Garantía (G)

5.2.4. PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS MEDIANTE AHP

Para obtener los pesos de cada alternativa, el primer paso es realizar y pasar a los expertos el cuestionario de priorización de criterios y alternativas por comparaciones pareadas y normalizar los criterios cuantitativos. A continuación, se muestra el cuestionario:

CUESTIONARIO DE PRIORIZACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS SOBRE LA SELECCIÓN DE UNA BATERIA PARA UN VEHÍCULO FERROVIARIO

INTRODUCCIÓN

La finalidad de este cuestionario es la obtención de un peso o preferencia para cada criterio/alternativa con el objetivo de calcular unos pesos globales y seleccionar la alternativa con mayor peso, es decir la más preferida por todos los decisores.

INSTRUCCIONES PARA CONTESTAR EL CUESTIONARIO

Siguiendo el método de las jerarquías analíticas, AHP, se van a realizar una serie de preguntas por comparaciones pareadas de criterios y subcriterios del mismo nivel y de alternativas respecto a criterios. Estas preguntas medirán cuanto de preferido es un criterio sobre el otro y todas ellas se evaluarán a través de una escala numérica.

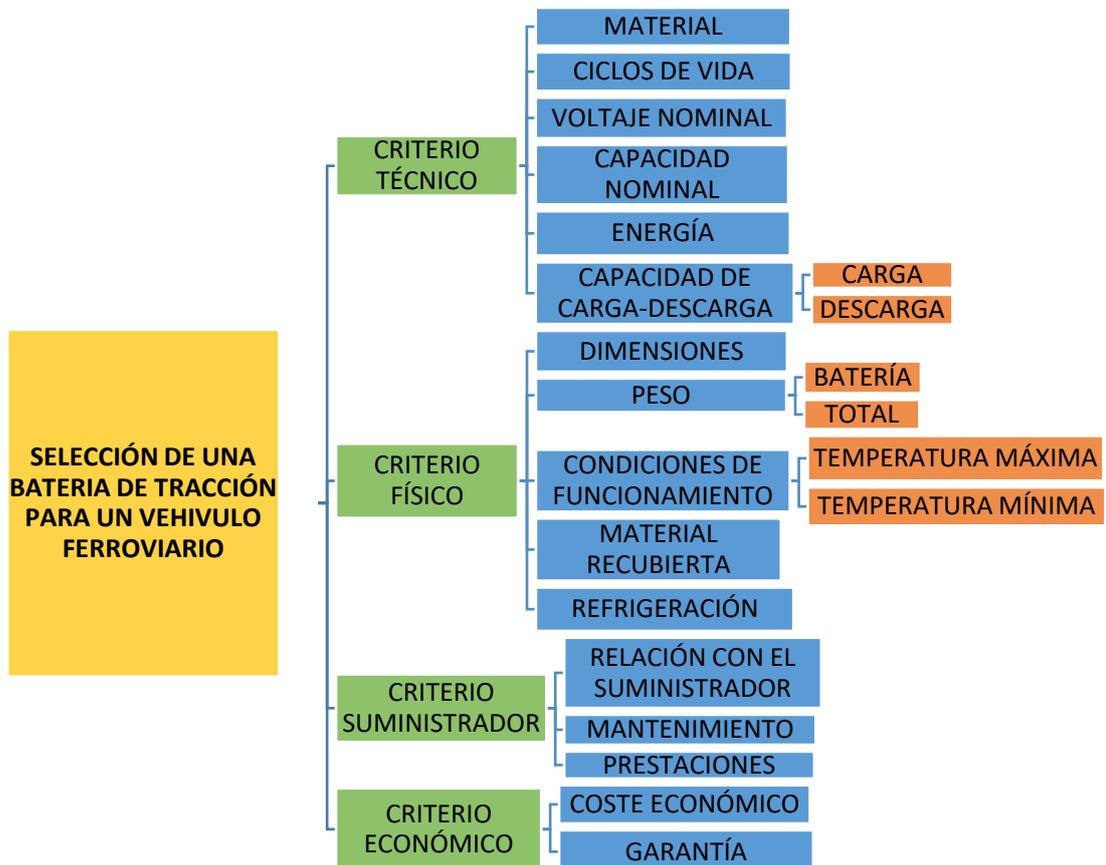
Se preguntará cómo de importante o preferido es el criterio/alternativa C_A/A_x frente al criterio C_B/A_y , utilizando la siguiente escala, donde R_{AB} es la respuesta dada por Ud a la pregunta.

- $R_{AB} = 1$: se considera **igualmente importante** el criterio A que el criterio B (=)
- $R_{AB} = 3$: se considera **moderadamente más importante** el criterio A que el criterio B (**MI**)
- $R_{AB} = 5$: se considera **bastante más importante** el criterio A que el criterio B (**F. Fuerte**)
- $R_{AB} = 7$: se considera **mucho más importante** (o demostrablemente más importante) el criterio A que el criterio B (**MF. Muy Fuerte**)

- $R_{AB} = 9$: se considera **extremadamente más importante** el criterio A que el criterio B (**EX. Extremo**)

	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	
Criterio C _A	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Criterio C _B

ESTRUCTURA JERÁRQUICA



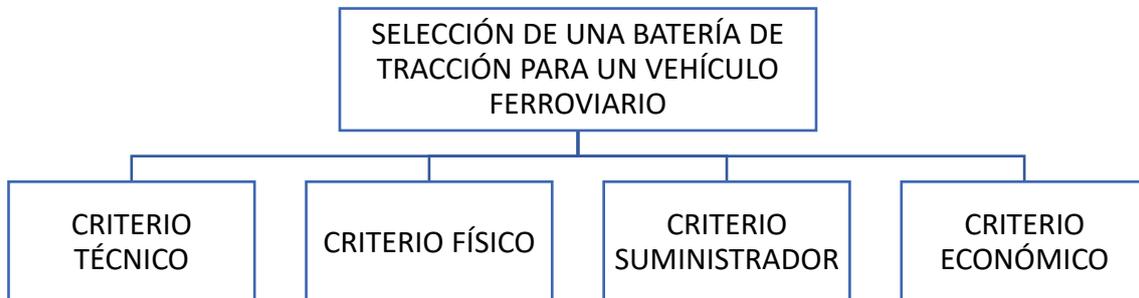
DEFINICIÓN DE LOS CRITERIO

CRITERIO	DEFINICIÓN
Material	Tipo de material usado para el ánodo y el cátodo. Define el tipo de batería que es.
Ciclos de vida	Se mide la vida útil del producto, cuantas veces se puede cargar y descargar manteniendo sus prestaciones dentro de un rango.
Voltaje nominal	Tensión que se espera tener en unas condiciones estándares.
Capacidad nominal	Es la cantidad de corriente que puede entregar hasta un determinado voltaje.
Energía	Cantidad de energía que puede suministrar la batería y depende de la tensión, corriente y tiempo.
Capacidad de carga - descarga	Cantidad de corriente que puede dar/recibir en un tiempo determinado.
Dimensiones	Espacio que ocupara la batería en el tren-tranvía.
Peso	Esta el peso de las baterías y el peso total que incluye el cooling (parte de refrigeración).
Condiciones de funcionamiento	Esta la temperatura máxima y la temperatura mínima del rango de operación.

CRITERIO	DEFINICIÓN
Material recubierta	Material de la carcasa
Refrigeración	La batería tiene que ser refrigerada ya que en funcionamiento se sobrecalienta
Relación con el suministrador	Relación que tiene la empresa con los suministradores
Mantenimiento	Algunas baterías requieren de revisiones periódicas para verificar el buen estado de la batería.
Prestaciones	El suministrador puede tener la opción de diseñarte la batería a medida según tu espacio
Coste económico	El precio de la batería
Garantía	Si hay un seguro por fallo de fabricación

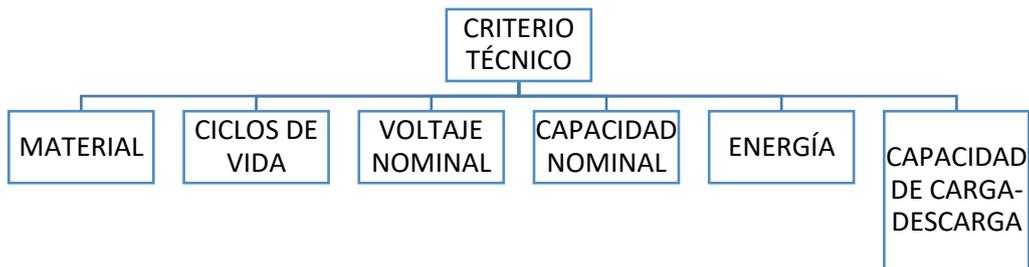
CUESTIONARIO

1. COMPARACIONES PAREADAS DE CRITERIOS



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el criterio... SELECCIÓN DE UNA BATERÍA DE TRACCIÓN PARA UN VEHÍCULO FERROVIARIO?										
Criterio C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterio C_B
C. Técnico	9	7	5	3	1	3	5	7	9	C. Físico
C. Técnico	9	7	5	3	1	3	5	7	9	C. Suministrador
C. Técnico	9	7	5	3	1	3	5	7	9	C. Económico
C. Físico	9	7	5	3	1	3	5	7	9	C. Suministrador
C. Físico	9	7	5	3	1	3	5	7	9	C. Económico
C. Suministrador	9	7	5	3	1	3	5	7	9	C. Económico

1.1. CRITERIO TÉCNICO



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el criterio... CRITERIO TÉCNICO?										
Criterio C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterio C_B
Material	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ciclos de Vida
Material	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Voltaje Nominal
Material	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad Nominal
Material	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Energía
Material	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad de Carga - Descarga
Ciclos de Vida	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Voltaje Nominal
Ciclos de Vida	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad Nominal
Ciclos de Vida	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Energía
Ciclos de Vida	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad de Carga - Descarga
Voltaje Nominal	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad Nominal
Voltaje Nominal	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Energía
Voltaje Nominal	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad de Carga - Descarga

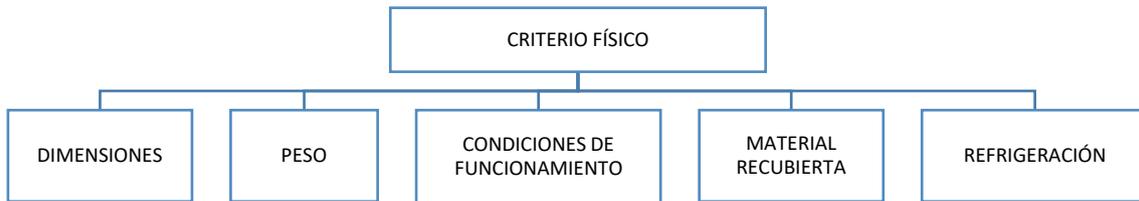
Capacidad Nominal	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Energía
Capacidad Nominal	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad de Carga - Descarga
Energía	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Capacidad de Carga - Descarga

1.1.1. SUBCRITERIO DE CAPACIDAD DE CARGA-DESCARGA



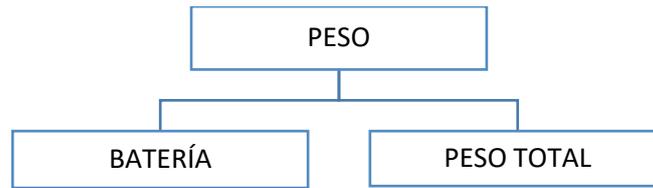
Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el criterio... CAPACIDAD DE CARGA-DESCARGA?										
Criterio C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterio C_B
Carga	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Descarga

1.2. CRITERIO FÍSICO



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el criterio... CRITERIO FÍSICO?										
Criterion C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterion C_B
Dimensiones	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Peso
Dimensiones	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Condiciones de Funcionamiento
Dimensiones	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Material Recubierta
Dimensiones	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Refrigeración
Peso	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Condiciones de Funcionamiento
Peso	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Material Recubierta
Peso	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Refrigeración
Condiciones de Funcionamiento	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Material Recubierta
Condiciones de Funcionamiento	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Refrigeración
Material Recubierta	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Refrigeración

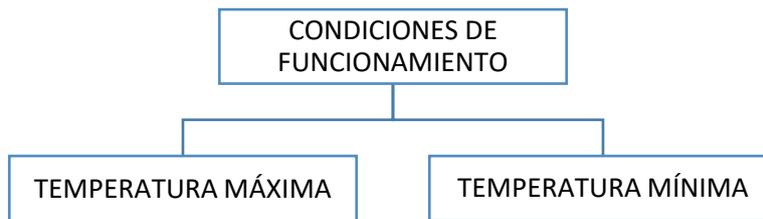
1.2.1. SUBCRITERIO DE PESO



**Desde su punto de vista,
¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el subcriterio...
PESO?**

Criterio C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterio C_B
Batería	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Peso Total

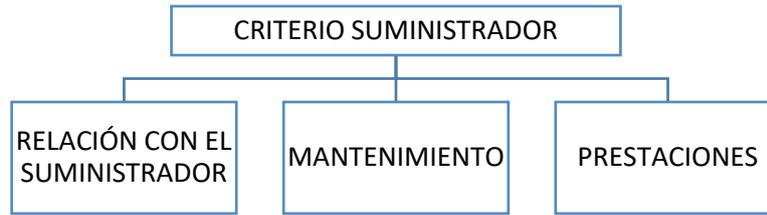
1.2.2. SUBCRITERIO DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO



**Desde su punto de vista,
¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el subcriterio...
CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO?**

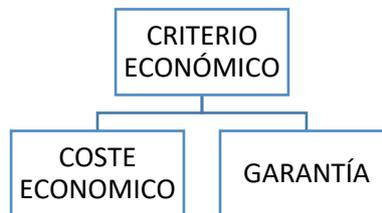
Criterio C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterio C_B
Temperatura Máxima	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Temperatura Mínima

1.3. CRITERIO SUMINISTRADOR



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el criterio... CRITERIO SUMINISTRADOR?										
Criterio C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterio C_B
Relación con el Suministrador	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Mantenimiento
Relación con el Suministrador	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Prestaciones
Mantenimiento	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Prestaciones

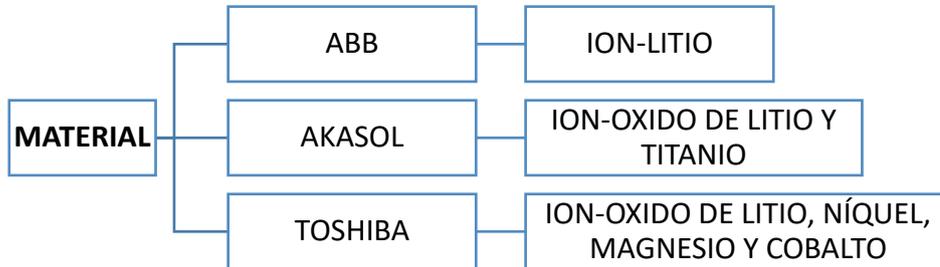
1.4. CRITERIO ECONÓMICO



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferido es C_A sobre C_B para evaluar el criterio... CRITERIO ECONÓMICO?										
Criterio C_A	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	Criterio C_B
Coste Económico	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Garantía

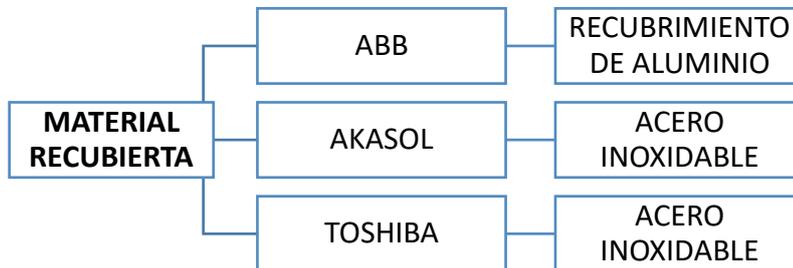
2. COMPARACIONES PAREADAS DE ALTERNATIVAS

2.1. MATERIAL



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferida es A_x sobre A_y respecto al criterio... MATERIAL?										
ALTERNATIVA A_x	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	ALTERNATIVA A_y
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	AKASOL
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA
AKASOL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA

2.2. MATERIAL RECUBIERTA



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferida es A_x sobre A_y respecto al criterio... MATERIAL RECUBIERTA?										
ALTERNATIVA A_x	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	ALTERNATIVA A_y
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	AKASOL
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA
AKASOL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA

2.3. REFRIGERACIÓN



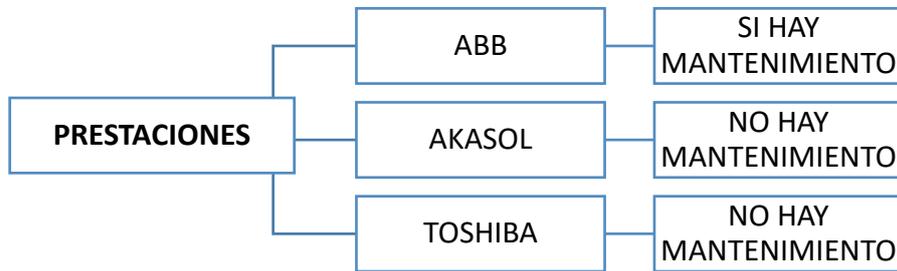
Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferida es A_x sobre A_y respecto al criterio... REFRIGERACIÓN?										
ALTERNATIVA A_x	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	ALTERNATIVA A_y
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	AKASOL
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA
AKASOL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA

2.4. RELACIÓN CON EL SUMINISTRADOR



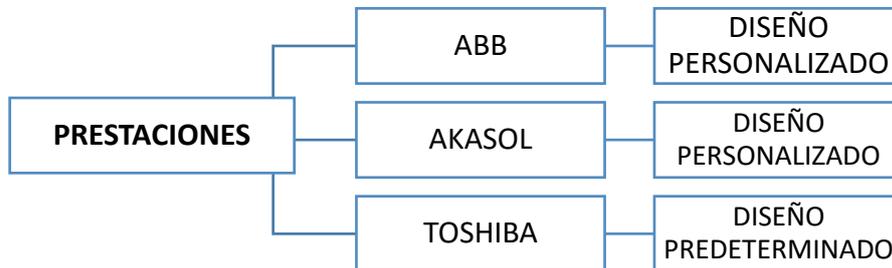
Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferida es A_x sobre A_y respecto al criterio... RELACIÓ CON EL SUMINISTRADOR?										
ALTERNATIVA A_x	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	ALTERNATIVA A_y
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	AKASOL
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA
AKASOL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA

2.5. MANTENIMIENTO



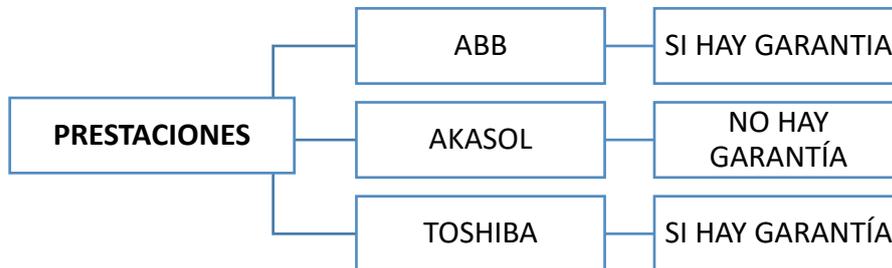
Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferida es A_x sobre A_y respecto al criterio... MANTENIMIENTO?										
ALTERNATIVA A_x	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	ALTERNATIVA A_y
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	AKASOL
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA
AKASOL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA

2.6. PRESTACIONES



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferida es A_x sobre A_y respecto al criterio... PRESTACIONES?										
ALTERNATIVA A_x	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	ALTERNATIVA A_y
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	AKASOL
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA
AKASOL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA

2.7. GRANTÍA



Desde su punto de vista, ¿Cuánto de preferida es A_x sobre A_y respecto al criterio... GARANTÍA?										
ALTERNATIVA A_x	EX	MF	F	MI	=	MI	F	MF	EX	ALTERNATIVA A_y
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	AKASOL
ABB	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA
AKASOL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TOSHIBA

La normalización de los criterios cuantitativos se calcula sumando todos ellos para después dividir el valor de cada alternativa entre el total.

		A1	A2	A3	UNIDAD	TOTAL	AN1	AN2	AN3	
CT	CV	10000	7000	10000	Ciclos	27000	0,370	0,259	0,370	
	VN	497	799	500	VDC	1796	0,277	0,445	0,278	
	CN	138	46	60	Ah	244	0,566	0,189	0,246	
	E	69	36,8	165	kWh	270,8	0,255	0,136	0,609	
	C-	CC	73,4	184	30	kW/10s	287,4	0,255	0,640	0,104
	D	CD	150	334	120	kWh	604	0,248	0,553	0,199
CF	D	L	2056	3688	1900	mm	7644	0,269	0,482	0,249
		W	1686	1500	2300	mm	5486	0,307	0,273	0,419
		H	500	432	545	mm	1477	0,339	0,292	0,369
		D	1733208	2389824	2381650	m3	6504682	0,266	0,367	0,366
	P	B	1500	1600	1850	kg	4950	0,303	0,323	0,374
		T	1695	1720	1850	kg	5265	0,322	0,327	0,351
	CF	TMax	40	55	55	°C	150	0,267	0,367	0,367
		TMin	-25	-15	-30	°C	-70	0,357	0,214	0,429
CE	C	136000	199000	132000	€	467000	0,291	0,426	0,283	

Tabla 12 Normalización de criterios cuantitativos

Una vez contestados los cuestionarios, se trasladan las respuestas por expertos a la matriz de comparaciones pareadas. Una vez montadas, se obtienen los vectores de pesos de los criterios y alternativas. Se realiza el mismo procedimiento para la media geométrica obtenida del conjunto de respuestas de todos los expertos. La media geométrica se considerará como un cuarto experto representando una visión global del grupo de expertos, como se ha comentado con anterioridad.

En las tablas 13 y 14 se muestran los pesos obtenidos para los criterios y alternativas.

	PESOS LOCALES			
	E1	E2	E3	MG
CT	0,60	0,44	0,61	0,71
M	0,07	0,03	0,03	0,04
CV	0,15	0,46	0,27	0,32
VN	0,15	0,05	0,03	0,06
CN	0,11	0,15	0,27	0,18
E	0,11	0,15	0,27	0,18
CC-D	0,41	0,15	0,13	0,22
CC	0,13	0,17	0,50	0,20
CD	0,88	0,83	0,50	0,80
CF	0,23	0,07	0,24	0,14
D	0,08	0,05	0,34	0,09
P	0,49	0,27	0,34	0,35
B	0,13	0,25	0,50	0,25
T	0,88	0,75	0,50	0,75
CF	0,08	0,14	0,17	0,13
TMax	0,90	0,75	0,25	0,67
TMin	0,10	0,25	0,75	0,33
MR	0,08	0,03	0,04	0,05
R	0,28	0,50	0,10	0,38
CS	0,04	0,11	0,09	0,04
RS	0,20	0,07	0,14	0,13
M	0,20	0,71	0,43	0,54
P	0,60	0,22	0,43	0,33
CE	0,13	0,38	0,06	0,11
CE	0,83	0,83	0,83	0,83
G	0,17	0,17	0,17	0,17

Tabla 13 Pesos locales de los criterios

MATERIAL	VECTOR DE PESOS			
	E1	E2	E3	MG
ABB	0,6854	0,4545	0,4286	0,5726
AKASOL	0,0802	0,0909	0,1429	0,1002
TOSHIBA	0,2344	0,4545	0,4286	0,3272
MATERIAL RECUBIERTA	VECTOR DE PESOS			
	E1	E2	E3	MG
ABB	0,6854	0,7007	0,1429	0,4885
AKASOL	0,0802	0,0972	0,4286	0,18
TOSHIBA	0,2344	0,2021	0,4286	0,3315
REFRIGERACIÓN	VECTOR DE PESOS			
	E1	E2	E3	MG
ABB	0,6854	0,4545	0,4286	0,6704
AKASOL	0,0802	0,909	0,4286	0,198
TOSHIBA	0,2344	0,4545	0,1429	0,1316
RELACIÓN SUMINISTRADOR	VECTOR DE PESOS			
	E1	E2	E3	MG
ABB	0,6854	0,7143	0,7662	0,841
AKASOL	0,0802	0,1429	0,1579	0,0747
TOSHIBA	0,2344	0,1429	0,0759	0,0843
MANTENIMIENTO	VECTOR DE PESOS			
	E1	E2	E3	MG
ABB	0,2583	0,3189	0,0909	0,2211
AKASOL	0,1047	0,46	0,4545	0,3189
TOSHIBA	0,637	0,2211	0,4545	0,46
PRESTACIONES	VECTOR DE PESOS			
	E1	E2	E3	MG
ABB	0,7147	0,4286	0,1429	0,4595
AKASOL	0,2185	0,1429	0,7143	0,3422
TOSHIBA	0,0668	0,4286	0,1429	0,1983
GARANTÍA	VECTOR DE PESOS			
	E1	E2	E3	MG
ABB	0,6491	0,7306	0,7306	0,7184
AKASOL	0,0719	0,081	0,081	0,0774
TOSHIBA	0,279	0,1884	0,1884	0,2042

Tabla 14 Pesos de las alternativas

En el caso de los criterios, hemos convertido los pesos locales (ponderados respecto a su nivel padre) a globales (ponderados respecto al objetivo).

	PESOS GLOBALES			
	E1	E2	E3	MG
CT	0,60	0,44	0,61	0,71
M	0,04	0,01	0,02	0,03
CV	0,09	0,20	0,17	0,22
VN	0,09	0,02	0,02	0,05
CN	0,07	0,07	0,17	0,13
E	0,07	0,07	0,17	0,13
CC-D	0,24	0,07	0,08	0,15
CC	0,03	0,01	0,04	0,03
CD	0,21	0,06	0,04	0,12
CF	0,23	0,07	0,24	0,14
D	0,02	0,00	0,08	0,01
P	0,11	0,02	0,08	0,05
B	0,01	0,00	0,04	0,01
T	0,10	0,01	0,04	0,04
CF	0,02	0,01	0,04	0,02
TMax	0,02	0,01	0,01	0,01
TMin	0,00	0,00	0,03	0,01
MR	0,02	0,00	0,01	0,01
R	0,06	0,03	0,02	0,06
CS	0,04	0,11	0,09	0,04
RS	0,01	0,01	0,01	0,00
M	0,01	0,08	0,04	0,02
P	0,02	0,02	0,04	0,01
CE	0,13	0,38	0,06	0,11
CE	0,11	0,31	0,05	0,09
G	0,02	0,06	0,01	0,02
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 15 Pesos globales de los criterios

Las dos últimas filas corresponden a la suma de los pesos por niveles, pudiéndose comprobar que la ponderación es correcta. La fila correspondiente al color verde representa la suma total de los pesos de los criterios del primer nivel y la fila correspondiente al color naranja es la suma de todos los subcriterios del ultimo nivel más aquellos criterios que no tiene ultimo nivel.

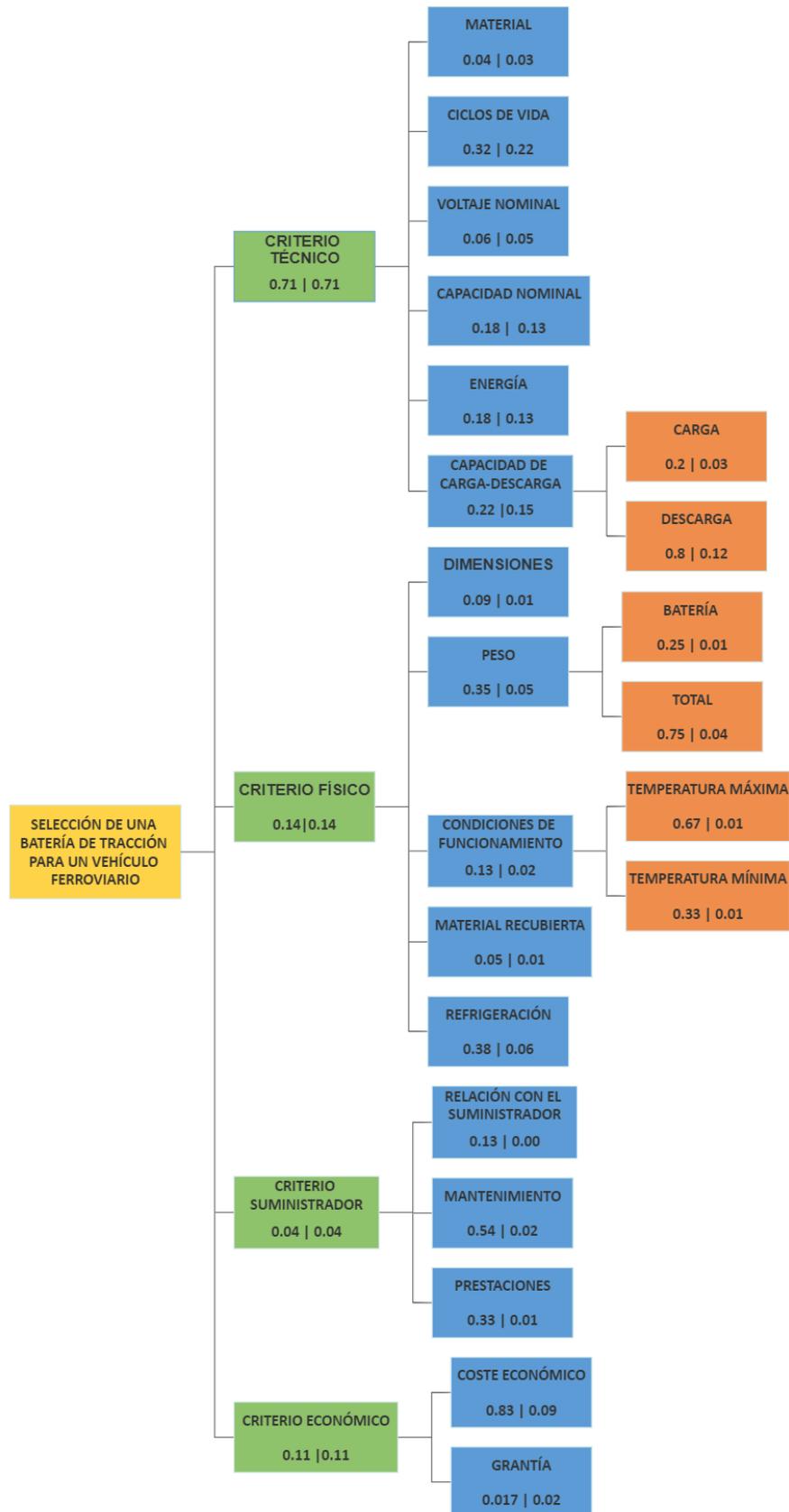


Figura 12 Estructura jerárquica de la media geométrica con pesos locales y globales
Fuente: Elaboración propia



En la figura anterior se muestra la estructura jerárquica donde cada criterio lleva en primer lugar, su peso local y en segundo lugar, su peso global.

A continuación, montamos la matriz de decisiones para cada experto y para la media geométrica con los valores normalizados de los criterios cuantitativos, con los pesos globales de los criterios y los pesos de las alternativas.

Para la tabla 16, el color naranja corresponde a los criterios y subcriterios, el gris a los valores obtenidos tras la normalización de los criterios cuantitativos y el blanco representa los pesos de las alternativas tras el análisis de los juicios de los expertos.

EXPERTO 1	M	CV	VN	CN	E	CC	CD	D	B	T	TMax	TMin	MR	R	RS	M	P	CE	G
PESOS GLOBALES	0,040	0,088	0,093	0,068	0,068	0,030	0,212	0,017	0,014	0,097	0,015	0,002	0,019	0,064	0,008	0,008	0,024	0,112	0,022
ABB	0,685	0,370	0,277	0,566	0,255	0,255	0,248	0,266	0,303	0,322	0,267	0,357	0,685	0,685	0,685	0,258	0,715	0,291	0,649
AKASOL	0,080	0,259	0,445	0,189	0,136	0,640	0,553	0,367	0,323	0,327	0,367	0,214	0,080	0,080	0,080	0,105	0,219	0,426	0,072
TOSHIBA	0,234	0,370	0,278	0,246	0,609	0,104	0,199	0,366	0,374	0,351	0,367	0,429	0,234	0,234	0,234	0,637	0,067	0,283	0,279
EXPERTO 2	M	CV	VN	CN	E	CC	CD	D	B	T	TMax	TMin	MR	R	RS	M	P	CE	G
PESOS GLOBALES	0,013	0,205	0,023	0,067	0,067	0,011	0,056	0,004	0,005	0,014	0,007	0,002	0,002	0,035	0,008	0,082	0,025	0,313	0,063
ABB	0,455	0,370	0,277	0,566	0,255	0,255	0,248	0,266	0,303	0,322	0,267	0,357	0,701	0,455	0,714	0,319	0,429	0,291	0,731
AKASOL	0,091	0,259	0,445	0,189	0,136	0,640	0,553	0,367	0,323	0,327	0,367	0,214	0,097	0,909	0,143	0,460	0,143	0,426	0,081
TOSHIBA	0,455	0,370	0,278	0,246	0,609	0,104	0,199	0,366	0,374	0,351	0,367	0,429	0,202	0,455	0,143	0,221	0,429	0,283	0,188
EXPERTO 3	M	CV	VN	CN	E	CC	CD	D	B	T	TMax	TMin	MR	R	RS	M	P	CE	G
PESOS GLOBALES	0,016	0,166	0,016	0,166	0,166	0,040	0,040	0,084	0,042	0,042	0,011	0,032	0,010	0,024	0,013	0,038	0,038	0,048	0,010
ABB	0,685	0,370	0,277	0,566	0,255	0,255	0,248	0,266	0,303	0,322	0,267	0,357	0,143	0,429	0,766	0,091	0,143	0,291	0,731
AKASOL	0,080	0,259	0,445	0,189	0,136	0,640	0,553	0,367	0,323	0,327	0,367	0,214	0,429	0,429	0,158	0,455	0,714	0,426	0,081
TOSHIBA	0,234	0,370	0,278	0,246	0,609	0,104	0,199	0,366	0,374	0,351	0,367	0,429	0,429	0,143	0,076	0,455	0,143	0,283	0,188
EXPERTO MG	M	CV	VN	CN	E	CC	CD	D	B	T	TMax	TMin	MR	R	RS	M	P	CE	G
PESOS GLOBALES	0,028	0,224	0,046	0,128	0,128	0,031	0,123	0,012	0,013	0,039	0,012	0,006	0,007	0,056	0,005	0,019	0,012	0,093	0,022
ABB	0,573	0,370	0,277	0,566	0,255	0,255	0,248	0,266	0,303	0,322	0,267	0,357	0,489	0,670	0,841	0,221	0,460	0,291	0,718
AKASOL	0,100	0,259	0,445	0,189	0,136	0,640	0,553	0,367	0,323	0,327	0,367	0,214	0,180	0,198	0,075	0,319	0,342	0,426	0,077
TOSHIBA	0,327	0,370	0,278	0,246	0,609	0,104	0,199	0,366	0,374	0,351	0,367	0,429	0,332	0,132	0,084	0,460	0,198	0,283	0,204

Tabla 16 Matriz de decisiones por expertos

Resolviendo las matrices de decisión como se ha explicado en el apartado “5.1.5 priorización de alternativas mediante AHP”, se obtiene la alternativa preferida por cada experto y la que sería la solución global como se muestra en la tabla, con los resultados de cada alternativa por expertos, y una figura, dónde se pueden observar de manera más gráfica.

E1	ABB	0,374574928
	AKASOL	0,3368541
	TOSHIBA	0,288493642
E2	ABB	0,365761517
	AKASOL	0,347299798
	TOSHIBA	0,315580823
E3	ABB	0,346930956
	AKASOL	0,304139457
	TOSHIBA	0,348966205
MG	ABB	0,377880355
	AKASOL	0,301624803
	TOSHIBA	0,324247022

Figura 13 Resultados de las alternativas agrupados por expertos



Figura 14 Comparación de resultados finales de cada alternativa agrupadas por expertos

Para concluir se observa que todas las alternativas tienen resultados muy parecidos, no hay ninguna que destaque sobre las demás. Todos los expertos prefieren la Alternativa 1, ABB, excepto el experto 3, que prefiere la Alternativa 3, THOSIBA, aunque quedando ambas soluciones muy cerca. A pesar de eso, podemos decir, mirando la media geométrica, que la más preferida por el grupo de expertos es la Alternativa 1, ABB.

Se han comentado los resultados con el grupo de experto y se encuentran satisfechos con la solución obtenida.

5.2.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Este apartado consiste en sacar conclusiones más complejas sobre el resultado variando el peso de los criterios, analizando así como varía la solución.

Se va a proceder variando el criterio del primer nivel de mayor peso. En este caso el que tiene mayor peso es el técnico, por lo que se va a reducir en un 10% y 20% su peso, repartiéndolo en partes iguales al resto de criterios del mismo nivel.

		SIN VARIAR	VARÍA 10%	VARÍA 20%
E1	E1: ABB	0,375	0,383	0.391
	E1: AKASOL	0,337	0,329	0.322
	E1: TOSHIBA	0,288	0,288	0.287
E2	E2: ABB	0,366	0,366	0.367
	E2: AKASOL	0,347	0,355	0.362
	E2: TOSHIBA	0,316	0,314	0.312
E3	E3: ABB	0,347	0,342	0.336
	E3: AKASOL	0,304	0,314	0.324
	E3: TOSHIBA	0,349	0,345	0.340
MG	MG: ABB	0,378	0,378	0.381
	MG: AKASOL	0,302	0,302	0.303
	MG: TOSHIBA	0,325	0,320	0.316

Tabla 17 Soluciones de las alternativas

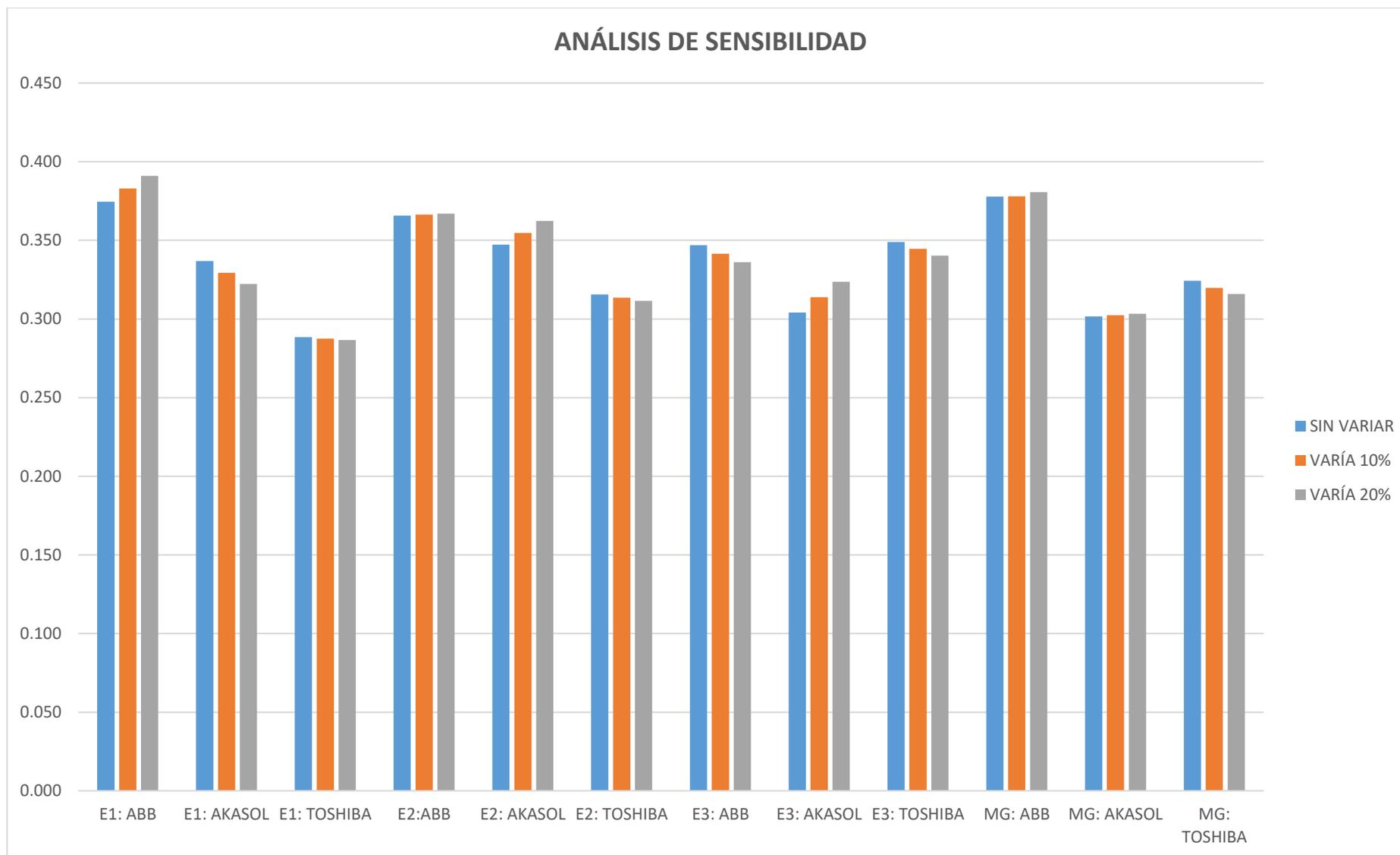


Figura 15 Gráfica de soluciones del análisis de sensibilidad



Se observa que variando un 10% la solución cambia muy poco, todo lo contrario a cuando se varia un 20% que si que se pueden ver cambios significativos. Por ello, se va a proceder a analizar los resultados de la última variación.

Se observa que tanto como para el Experto 1, como el 2 y como la Media Geométrica los resultados de las soluciones varían haciendo destacar la alternativa más preferida obtenida en el apartado anterior, ABB.

Para el caso del Experto 3, en el apartado anterior se había concluido que su Alternativa preferida era la 3, TOSHIBA, quedando la Alternativa 1 bastante cerca. Sin embargo, tras el análisis de sensibilidad, se puede analizar que es el único Experto al que las dos alternativas más preferidas, en vez subir el peso de las soluciones se han reducido.

En definitiva, el análisis afianza el resultado obtenido anteriormente, concluyendo que la alternativa más preferida casi para todos es la Alternativa 1, cuyo suministrador de baterías es ABB.

6. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el proyecto dejamos paso para las reflexiones finales de todo el proceso de realización.

La parte más importante de este trabajo ha sido sin duda el aprendizaje y puesta en práctica del proceso de análisis jerárquico, también llamado AHP. Hemos podido profundizar en esta metodología y descubrir todo el potencial que tiene a la hora de solucionar problemas. Además, destaca por encontrar soluciones teniendo en cuenta criterios tanto subjetivos como objetivos y valorando todo tipo de puntos de vista, aunque sean contrarios entre sí.

El trabajo ha consistido, una vez conocida la metodología y la tecnología, en identificar todos los criterios y características de las alternativas, entre las que la empresa de Stadler estaba indecisa, para la toma de decisión y estructurarlos jerárquicamente de la forma más correcta para optimizar la solución. Dada la aprobación por el grupo de expertos a la estructura jerárquica y a los criterios y características que se iban a estudiar, se procedió a la realización del cuestionario. Tras la recogida de juicios y resolución analítica del proceso, se obtiene que la alternativa seleccionada es la de ABB. Además, se comprueba la fiabilidad de la solución tras un análisis más complejo, afianzando la alternativa seleccionada en primera instancia, ABB.

Cabe destacar que, para poder realizar este proceso de toma de decisión, hemos tenido que investigar a fondo las baterías de tracción de vehículos ferroviarios. Es una tecnología que está en vías de desarrollo y por ello nos hemos encontrado con dificultades como: el acceso a información limitado, aunque hemos podido contar con la ayuda de Stadler, y un reducido abanico de alternativas.

Durante todo el proceso hemos continuado aprendiendo tanto de la metodología como de la tecnología estudiada y consideramos que el haber trabajado de esta manera con tecnología novedosa es una experiencia valiosa. Esto es un tema que, sin lugar a duda, va a ocupar un puesto muy importante en la industria estudiada y del que sin duda se va a estar hablando estos próximos años, sirviendo como modelo esta metodología para futuras tomas de decisión relacionadas con esta tecnología.



Por último, tal y como comentamos al principio del trabajo, uno de nuestros objetivos era aportar de algún modo, ayuda o apoyo al cambio medioambiental propuesto para la descarbonización en 2050. Somos conscientes de la dificultad de cumplir dicho objetivo propuesto por la comisión europea según la tecnología de hoy en día. Por lo tanto, pese a ser una humilde aportación consideramos que hemos cumplido el objetivo propuesto en este trabajo y estamos muy satisfechos con los resultados obtenidos.



7. PRESUPUESTO

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA AHP				
DESCRIPCIÓN	U	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE
Planteamiento del problema y planificación de las actividades a realizar	€/h	50 €	2 h	100 €
Recopilación de información sobre la metodología AHP	€/h	50 €	7 h	350 €
Consulta de expertos de la técnica	€/h	50 €	3 h	150 €
Consulta de expertos de proyectos	€/h	50 €	3 h	150 €
Análisis de la información recopilada	€/h	50 €	3 h	150 €
Edición de textos	€/h	12 €	5 días (8h)	480 €
Utilización de equipo informático	€/h	3 €	5 días (8h)	100 €
			TOTAL	1,480 €



ANÁLISIS DE LAS BATERÍAS DE TRACCIÓN E VEHÍCULOS FERROVIARIOS

DESCRIPCIÓN	U	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE
Planteamiento del problema y planificación de las actividades a realizar	€/h	50 €	1 h	50 €
Recopilación de información sobre el sector ferroviario	€/h	50 €	3 h	150 €
Recopilación de información sobre las baterías	€/h	50 €	3 h	150 €
Consulta de expertos de Stadler	€/h	50 €	3 h	150 €
Análisis de la información recopilada	€/h	50 €	2 h	100 €
Edición de textos	€/h	12 €	5 días (8h)	480 €
Utilización de equipo informático	€/h	3 €	5 días (8h)	100 €
			TOTAL	1,180 €



IMPLANTACIÓN DE LA METODOLOGÍA AHP				
DESCRIPCIÓN	U	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE
Planteamiento del problema y planificación de las actividades a realizar	€/h	50 €	2 h	100 €
Realización del listado de criterios	€/h	60 €	1 h	60 €
Estudio de las diferentes alternativas	€/h	60 €	8 h	480 €
Consulta de expertos de ingeniería	€/h	80 €	2 h	160 €
Realización de la estructura jerárquica	€/h	60 €	8 h	480 €
Realización del cuestionario	€/h	60 €	3 h	180 €
Consulta de expertos de proyectos	€/h	60 €	3 h	180 €
Cálculos	€/h	60 €	3 h	180 €
Análisis de la información	€/h	60 €	10 h	600 €
Edición de textos	€/h	12 €	6 días (8h)	576 €
Utilización de equipo informático	€/h	3 €	6 días (8h)	120 €
			TOTAL	3,116 €



PRESUPUESTO TOTTAL DEL PROYECTO	
DESCRIPCIÓN	IMPORTE
ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA AHP	1,480 €
ANÁLISIS DE LAS BATERÍAS DE TRACCIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS	1,180 €
IMPLANTACIÓN DE LA METODOLOGÍA AHP	3,116 €
PEM	5,776 €
IVA (21%)	1,213 €
PRESUPUESTO BASE DE LICITACION	6,989 €

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. EUROPEA, «The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050».
- [2] I. d. E. Fiscales, «Los objetivos de descarbonización y el Plan Nacional. Integrado de Energía y Clima: una valoración.».
- [3] C. EUROPEA, «COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO».
- [4] AEMA, «Emisiones de dióxido de carbono procedentes del transporte de pasajeros,» [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/infografia/emisiones-de-dioxido-de-carbono/view>.
- [5] ADIF, «Declaracion sobre la red 2021».
- [6] L. E. BIOGRAFICA, «LA ENCICLOPEDIA BIOGRAFICA,» [En línea]. Available: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/v/volta.htm>.
- [7] T. d. I. Baterías. [En línea]. Available: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf#:~:text=Funcionamiento%20B%3%A1sico%20En%20general%20el%20funcionamiento%20de%20una,y%20el%20c%3%A1todo%20donde%20se%20efect%3%BAa%20la%20reducci%3%B3n>.
- [8] CSIC, «Jornadas "Innovación en gestión energética". Supercondensadors y baterías».
- [9] R. Galán Cenalmor, «ANÁLISIS DE VEHÍCULOS INDUSTRIALES HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS.NOVEDADES TÉCNICAS Y PERICIALES.».

- [10] L. Gogolák, S. Csikós, T. Molnár, P. Szuchy, I. Bíró y J. Sárosi, «POSSIBILITIES OF OPTIMIZING FUEL CONSUMPTION IN HYBRID AND ELECTRONIC AIRPLANES».
- [11] REBACAS, «Efecto De La Temperatura En Las Baterías,» [En línea]. Available: https://www.rebacas.com/blog-baterias/23_Efecto-de-la-temperatura-en-las-bater%C3%ADas.html.
- [12] D. M. Y. HERRAMIENTAS, «DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS,» [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/baterias-como-y-en-funcion-de-que-elegirlas>.
- [13] E. UNICROM, «ELECTRONICA UNICROM,» [En línea]. Available: <https://unicrom.com/historia-de-la-bateria-de-litio-ion/#:~:text=El%20trabajo%20precursor%20con%20bater%C3%ADas%20de%20litio%20comenz%C3%B3,ochenta%2C%20pero%20fallaron%20debido%20a%20problemas%20de%20seguridad..>
- [14] . M. O. A. R. y J. T. , «Baterías de ion litio: presente y futuro,» [En línea]. Available: <https://unlp.edu.ar/frontend/media/72/33472/216c108105d5ccb4e8f64bc6e0e6e274.pdf>.
- [15] M. G. Melón. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=c18b1ef0-2f75-11e9-bc31-79db65b2455a>.
- [16] M. G. Melón. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=328abab0-2f81-11e9-bc31-79db65b2455a>.
- [17] M. G. Melón. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=4082a060-2f81-11e9-bc31-79db65b2455a>.
- [18] M. G. Melón. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=53c58110-2f81-11e9-bc31-79db65b2455a>.
- [19] M. G. Melon. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=5e468f80-2f81-11e9-bc31-79db65b2455a>.



- [20] M. G. Melón. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=97297000-2f82-11e9-8205-ef26a6b6a978>.
- [21] M. G. Melón. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=3160d1f0-2f87-11e9-8205-ef26a6b6a978>.
- [22] M. G. Melón. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/player/?id=37f19420-34fd-11e9-b045-2178119ef693>.
- [23] C. d. M. Consejería de Economía y Hacienda, «FENERCOM,» [En línea]. Available: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2015/04/Guia-del-Vehiculo-Elctrico-II-fenercom-2015.pdf>.
- [24] L. M. Handling, «Linde Material Handling,» [En línea]. Available: <https://www.linde-mh.es/es/Acerca-de-Linde/Blog/diferencias-bateria-litio-bateria-plomo/>.
- [25] C. P. Ordóñez., «ESTUDIO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.».