



Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios

Análisis y justificación de las necesidades de los trenes de Cercanías

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO: 2020 - 2021

Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI

Autor: **Manuel Amador Cayuela**

Director: **Víctor Quintana Polo**

FICHA TÉCNICA

Alumno: Manuel Amador Cayuela

Director: Víctor Quintana Polo

Programa cursado: Máster en Sistemas Ferroviarios

Curso académico: 2020/2021

Título del trabajo: Análisis y justificación de las necesidades de los trenes de Cercanías

Descripción breve del trabajo de fin de máster:

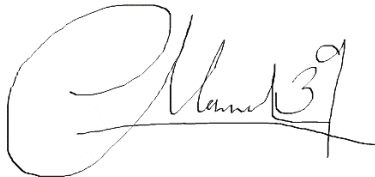
Se estudia la tendencia de la población de volverse cada vez más urbana con la intención de mostrar la necesidad urgente de mejorar la movilidad en las ciudades. En este sentido, se profundiza en las características que diferencian el ferrocarril del transporte por carretera con la finalidad de justificar que es el sistema principal gracias a su capacidad de transporte de masas, reducido consumo de energía y baja emisión de gases de efecto invernadero.

Después se pasa a analizar al Tren de Cercanías dentro del segmento “Mass Transit”. Se obtienen los rasgos principales que lo definen, las diferentes soluciones que pueden existir en cada aspecto, y las necesidades principales.

La máxima fiabilidad, capacidad, accesibilidad y una búsqueda en paralelo de mejorar la experiencia del usuario son las líneas de trabajo que se han encontrado fruto del estudio y en base a ellas se ha realizado la propuesta final.

Madrid, 2 de julio de 2021

ALUMNO



Manuel Amador Cayuela

DIRECTOR



Víctor Quintana Polo

Agradecimientos

Este periodo último periodo realizando mi trabajo de fin de máster ha sido un tiempo de desarrollo y aprendizaje intenso, no solo en el campo científico y tecnológico, sino también en el humano y personal. La elaboración de este proyecto ha tenido un gran impacto en mí historia, y, es por ello, que me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado durante este proceso.

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a mi tutor D. Víctor Quintana Polo por su dedicación, energía, ayuda y acompañamiento durante esta fase que nos ha unido. También quiero hacer una mención especial a los profesores Fernando Sunyer Mac Lennan y Alberto García Álvarez, que sin ellos no hubiese sentido tan de cerca la pasión por el transporte urbano, y en especial por el Cercanías.

Y por último quería mostrar mi agradecimiento también a mis compañeros de trabajo Maria Teresa del Corral y Juan Carlos Gómez Marín que me han enseñado con detenimiento y cariño el mundo ferroviario.

Ahora, en este último tiempo, por el Máster del que he disfrutado gracias a Talgo, por los amigos que he conocido, por lo que sigo teniendo y por los que quizás ya no vuelva a ver. Gracias a mis profesores, a los buenos y a los mejores, por su voluntad y su paciencia.

Por último, me gustaría dar las gracias a mis padres, mis hermanos y mi preciosa novia, por sus sabios consejos y su comprensión, por su apoyo incondicional sin el cual no habría sido capaz de finalizar el proyecto.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	iii
ÍNDICE	iv
Índice de figuras	v
Índice de tablas.....	vii
1. INTRODUCCION.....	1
1.1. Resumen.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Planificación.....	1
2. SEGMENTO MASS TRANSIT	2
2.1. Transporte urbano e interurbano	2
2.1.1 Movilidad urbana en las ciudades	2
2.1.2 Modos de transporte: público y privado.....	4
2.1.3 Análisis de los modos de transporte público	6
2.2. Estado del arte: CERCANÍAS	15
2.2.1 Evolución del Concepto	15
2.2.2 Definición del producto.....	18
2.2.3 Estudio del mercado	40
3. NUEVAS NECESIDADES	49
3.1. Nuevo Contexto.....	49
3.2. Nuevas líneas de trabajo.....	55
4. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	61
4.1. Conclusiones	61
4.2. Bibliografía	63

Índice de figuras

Figura 1. Reparto modal de los desplazamientos [1].	3
Figura 2. Costes directos e indirectos de los desplazamientos urbanos [2].....	4
Figura 3. Punto de equilibrio entre el transporte público y el coche.	5
Figura 4. Desplazamiento del punto de equilibrio incentivando el transporte público y desincentivando el coche.....	6
Figura 5. Pasajeros por hora y sentido [pphs] en día laborable, sábado y festivo [3].	7
Figura 6. Comparación de diferentes modos de transporte según capacidad unitaria, de línea y frecuencia de paso.	8
Figura 7. Emisiones de CO ₂ por pasajero.....	11
Figura 8. Costes a lo largo del ciclo de vida de un tren (30 años).....	11
Figura 9. Emisiones de efecto invernadero en E.E.U.U.....	14
Figura 10. Ejemplo de diferencia de tiempos de parada entre diferentes unidades de Cercanías [5].	17
Figura 11. Unidad de servicio de Cercanías de Stadler clase FLIRT (DMU izquierda, EMU derecha) [6, 7].	19
Figura 12. Composición autopropulsada compuesta por 3 coches de un CIVIA [8].	20
Figura 13. Composición autopropulsada en doble composición de CIVIA [8].	20
Figura 14. Tensiones de alimentación de catenaria en Europa [9].....	21
Figura 15. Tensiones de alimentación de catenaria en otros países de gran índole mundial.	21
Figura 16. Tren de Cercanías de CAF (Auckland, Nueva Zelanda) [10].....	22
Figura 17. Tren de Alstom Coradia iLint [4].	23
Figura 18. Anchos de vía en Europa [11].....	24
Figura 19. Anchos de vía en el mundo [11].	24
Figura 20. Ejemplos de gálibos en todo el mundo [3].....	25
Figura 21. Diferentes alturas de plataforma en Europa.....	25
Figura 22. Altura de plataforma en la que se puede operar con estribo deslizante.	26
Figura 23. Altura de plataforma en la que se puede operar con estribo deslizante y escalón extraíble.....	26
Figura 24. Altura de plataforma en la que se puede operar con rampa pivotante.	27
Figura 25. Trenes de 1 piso, 2 pisos y mixtos [6].	28
Figura 26. Arquitectura de bogies de caja convencional del UT-592 [8].....	30
Figura 27. Arquitectura de bogies de caja articulada del CIVIA [8].....	30
Figura 28. Arquitectura de caja suspendida del tranvía de Bombardier (Flexity Freedom) [12].	30
Figura 29. Localización de equipos [3].....	32
Figura 30. Distribución interior de asientos del Tren de Cercanías de CAF (Auckland, Nueva Zelanda) [10].	34
Figura 31. Distribución interior de asientos de la UT 446 de RENFE.	34

Figura 32. Ejemplos de mesas en trenes.....	36
Figura 33. Ejemplos de asideros.	37
Figura 34. Ejemplos de Mamparas.....	37
Figura 35. Espacio diáfano del coche intermedio del tren Coradia iLint de Alstom.	38
Figura 36. Distribución del mundo por regiones.....	41
Figura 37. Comparación de los diferentes criterios de compra [5].	41
Figura 38. Distribución del mercado desde el punto de vista del gálibo, altura de piso y tracción [5].	42
Figura 39. Distribución del mercado según el tipo de unidad (altura de piso y tracción) [5].	42
Figura 40. Liberalización de las OSP ferroviarias	43
Figura 41. Fabricantes de trenes en Europa.	44
Figura 42. Presencia en el mercado mundial de los diferentes fabricantes de trenes de Cercanías.	44
Figura 43. Material rodante de SIEMENS [13].	45
Figura 44. Material rodante de Alstom [4].....	46
Figura 45. Material rodante de CAF [10].....	46
Figura 46. Material rodante de STADLER [6].....	46
Figura 47. Material rodante de otros fabricantes [14].	47
Figura 48. Oferta de Stadler para la licitación de RENFE [6].....	47
Figura 49. Oferta de Alstom para la licitación de RENFE [4].	47
Figura 50. Trenes de CAF; Civia (izquierda) y CIVITY (derecha).	48
Figura 51. Líneas de trabajo futuras en trenes de Cercanías desde el punto de vista tecnológico.	50
Figura 52. Riesgo de transmisión en lugares cerrados con baja y alta densidad [15].	51
Figura 53. Remodelación del tren nocturno de largo recorrido de Amtrak [14].	53
Figura 54. Evolución de la demanda de transporte media semanal (en semanas laborables en nº de viajeros) [16].	54
Figura 55. Distribución Interior de la UT-446 de RENFE.....	55
Figura 56. Bocetos de las diferentes configuraciones de asientos dentro de un mismo espacio.	58
Figura 57. Asiento Isquiotibial Metro de Madrid.....	57
Figura 58. Bocetos de la propuesta final.	59
Figura 59. Planos de la propuesta final.	60
Figura 60. Render de la propuesta final	60
Figura 61. Situación de saturación máxima en un andén de la estación de Atocha.	61

Índice de tablas

Tabla 1. Planificación de Tareas	1
Tabla 2. Pesos añadidos según zona geográfica.....	7
Tabla 3. Capacidades máximas de transporte dependiendo del modo [4].	8
Tabla 4. Tipo de trayecto según el modo de transporte.....	9
Tabla 5. Ingresos y costes de los sistemas de transporte público en 2017 [1].....	10
Tabla 6. Consumo equivalente en L de gasolina por pasajero*100 km [3].	11
Tabla 7. Servicios de cada modo de transporte según el tiempo de trayecto.	12
Tabla 8. Anchos de vía en España [9].....	24
Tabla 9. Tracción Concentrada vs Tracción Distribuida.....	29
Tabla 10. Arquitectura de bogies convencional vs Arquitectura de bogies articulada.....	31
Tabla 11. Equipos bajo bastidor vs Equipos en techo.	32
Tabla 12. Comparación de tres diferentes configuraciones de asientos.	35
Tabla 13. Tipo de fijación de asientos según mecanismo de puertas.	36
Tabla 14. Crecimiento del tamaño total del mercado de cada parte del mundo (en billones de euros, media anual de los últimos tres años).	40
Tabla 15. Porcentaje del mercado de cada fabricante en cada región del mundo.	45

1. INTRODUCCION

1.1. Resumen

Se estudia la tendencia de la población de volverse cada vez más urbana con la intención de mostrar la necesidad urgente de mejorar la movilidad en las ciudades. En este sentido, se profundiza en las características que diferencian el ferrocarril del transporte por carretera con la finalidad de justificar que es el sistema principal gracias a su capacidad de transporte de masas, reducido consumo de energía y baja emisión de gases de efecto invernadero.

Después se pasa a analizar al Tren de Cercanías dentro del segmento “Mass Transit”. Se obtienen los rasgos principales que lo definen, las diferentes soluciones que pueden existir en cada aspecto, y las necesidades principales.

La máxima fiabilidad, capacidad, accesibilidad y una búsqueda en paralelo de mejorar la experiencia del usuario son las líneas de trabajo que se han encontrado fruto del estudio y en base a ellas se ha realizado la propuesta final.

1.2. Objetivos

Definición de los parámetros principales que debe cumplir un tren de Cercanías y su evolución futura. Para ello se plantean los siguientes ejercicios:

- Comprensión de los criterios de movilidad qué hacen decidir qué modo de transporte es el más apropiado dentro de un núcleo urbano.
- Entendimiento de las necesidades de un tren de Cercanías.
- Conocimiento de las diferentes soluciones aplicadas por los principales fabricantes implantados en el mercado.
- Establecimiento de los criterios relevantes en el diseño capaces de optimizar las prestaciones, accesibilidad y experiencia del pasajero.
- Obtención de los requisitos que valoran los usuarios más significativos.

1.3. Planificación

Se incluyen las tareas identificadas y su planificación temporal

Tabla 1. Planificación de Tareas

TAREA	FECHA	AVANCE
■ Comprensión de los criterios de movilidad en las ciudades	Marzo	100%
■ Estado del arte del Cercanías	Abril	100%
■ Análisis de nuevas necesidades	Mayo	100%
■ Propuesta de las soluciones a potenciar	Mayo	100%
■ Fin redacción y conclusiones	Junio	100%

2. SEGMENTO MASS TRANSIT

Entre las diferentes clasificaciones del sector ferroviario, el material rodante podría dividirse entre Trenes de Largo Recorrido que unen ciudades alejadas entre sí, destacando los trenes de alta velocidad entre otros. Y, el segmento de Mass Transit que da servicio a la ciudad, sus periferias y territorios colindantes. Están constituido sobre todo por tranvías, metros y trenes de Cercanías.

“Mass Transit” es el término utilizado para referirse al sistema integral de medios de transporte de masas. Su utilización es diaria y su capacidad elevada. De esta manera, pueden dar servicio cuando se forman picos de alta densidad de pasajeros.

Como sistema principal en la estrategia de movilidad de las ciudades, el ferrocarril tiene una fuerte interrelación con otros modos de transporte.

No existe reserva previa de los asientos y el tiempo de duración de los viajes es reducido (urbano menor a una hora, interurbano menor a dos horas). Las frecuencias de paso de los trenes se ajustan a la demanda de los pasajeros, existiendo horas pico y valle.

Todos los desplazamientos están tarifados de forma pública y generalmente escalonados de acuerdo con la distancia a recorrer.

El concepto difiere claramente entre las diferentes regiones del planeta. Por razones geográficas, históricas y económicas, el alcance y la utilización es muy diferente. En las ciudades antiguas y densas los sistemas son amplios y la frecuencia de paso es muy alta. Mientras que en las nuevas ciudades construidas en el último siglo tienen mayor dispersión siendo necesarias otras alternativas de transporte que llegue a más puntos.

Desde el punto de vista de la operación, en Asia este tipo de segmento es gestionado principalmente por conglomerados de empresas privadas con ánimo de lucro y que cotizan en bolsa. En Europa se puede encontrar este caso, pero mayoritariamente son empresas públicas las que se encargan de operar las líneas. En general, hasta el presente, el servicio ha sido deficitario desde el punto de vista económico, por lo cual está subvencionado por las autoridades.

2.1. Transporte urbano e interurbano

Previo al análisis dentro del segmento concreto del Cercanías, se ha querido analizar y desarrollar las razones del por qué es tan necesario el transporte urbano en las ciudades y cómo el ferrocarril se presenta como sistema principal en la estrategia de movilidad.

En los siguientes apartados se estudiará la problemática en la movilidad urbana actual en las ciudades y se observará cómo influye en la elección del modo de transporte aspectos como su coste asociado o nivel de demanda, entre otros. Esto permitirá obtener una visión perceptible de la situación del transporte urbano actual.

2.1.1 Movilidad urbana en las ciudades

La razón principal de la necesidad del transporte urbano en las ciudades es el tema de la movilidad. Una movilidad que se caracterice por el respeto al medio ambiente, y la intención de reducir el consumo individual y descontrolado de energía.

Desde un punto de vista urbanístico, en las últimas décadas las ciudades han crecido generalmente hacia las periferias. Esta forma dispersa en la que han crecido los núcleos urbanos ha sido acompañada de mejor o peor forma por la interconexión de los diferentes puntos de la ciudad a través de redes de carreteras y vías ferroviarias.

Las urbes que gozaban de planes territoriales han podido prevenir y controlar este crecimiento desarrollando sistemas de transporte urbano sostenibles; capaces de adaptarse a la demanda inducida en el tiempo. Mientras tanto, el resto de las ciudades solo han dedicado esfuerzo en trasladar la mayoría de la industria desde los núcleos urbanos hasta polígonos a las afueras. En estos lugares, las redes que interconectan el centro y la periferia son la suma de diferentes soluciones de transporte parciales y sin coordinación, que han dado lugar a un sistema endeble y destinado al fracaso.

En los últimos años, estas grandes ciudades por diferentes razones no han parado de crecer, y por lo que se ve, parece que el estilo de vida urbano es tendencia mundial. Se estima que en 2050 el 80% de la población viva en el entorno urbano. Este crecimiento ha multiplicado aún más la necesidad de movilidad. El rápido proceso de urbanización en muchos casos ha sido el motivo de generación de estas redes de transporte débiles, incapaces de atender en condiciones a las concentraciones tan altas de población.

Los resultados observados en ciudades como Bogotá, Lima, Estambul, Bucarest, Dublín, Madrid, Barcelona, Roma, Moscú... eran de esperar. Zonas urbanas y periféricas que no dejan de crecer, con una población con grandes necesidades de movilidad ya que el hogar, puesto de trabajo, supermercado, hospital... se encuentran en radios de entre 15 y 35 km, y redes de transporte desarrolladas tarde y de forma incompleta.

Las personas están respondiendo como pueden ante estas situaciones y necesidades de movilidad. La forma más frecuente por la que están optando es la del transporte en vehículo privado. En consecuencia, las carreteras de entrada y salida de las ciudades, y muchas calles y glorietas principales se convierten en lugares por donde mejor no intentar pasar. Estas ciudades no están diseñadas para el tráfico extremo que soportan. Lo que se supone que es un lugar para vivir, se convierte justo en lo contrario.

Las ciudades están diseñadas para ser habitables ¿Qué medios existen para solucionar este problema? Pues muy sencillo, mejorar los sistemas de transporte urbano e interurbano ¿Por qué? Porque el transporte colectivo es una de las alternativas más potentes que tiene el ser humano de poder crecer en una ciudad. No como un remedio, una solución parcial o un parche al problema. Sino como una vía de poder regularizar, ordenar e integrar la movilidad y sus diferentes modos de transporte.

Un buen sistema de transporte urbano es capaz de transformar la relación de cada persona con la ciudad y convertirla cada día en un lugar cada vez más habitable y sostenible.

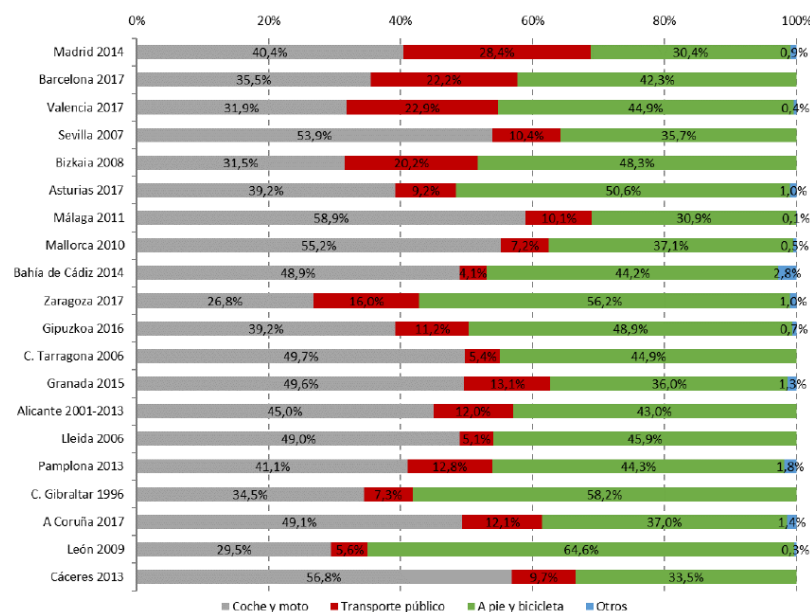


Figura 1. Reparto modal de los desplazamientos [1].

2.1.2 Modos de transporte: público y privado

La situación actual tras la pandemia viene acarreado un desuso y desconfianza del transporte público bastante notable. Los motivos son varios y se analizarán más adelante. Por tanto, la alternativa de transporte principal está volviendo a ser el coche.

Las organizaciones y gobiernos siguen sin regular este modo de transporte, y de forma indirecta se encuentra subvencionado. Por ejemplo, en países como España están empezando a desaparecer restricciones como peajes. En otros muchos, además, está volviendo a bajar el coste anual por aparcar.

También, este fenómeno se ve aumentado por la falta de soluciones que integren al coche privado con el transporte público en redes intermodales. Un ejemplo sería la construcción de parkings disuasorios cerca de las estaciones y paradas de tren y autobús en la periferia.

El respaldo gubernamental del vehículo privado está volviendo en todas las escalas a popularizar este medio como la mejor elección de modo de transporte. Además, se suma que la percepción generalizada del coste de desplazamiento no se acerca a la realidad, como se analizará a continuación.

Coste de desplazamiento

Para ayudar a entender el coste que tiene sobre la sociedad el desplazamiento de las personas, en la Figura 2 se muestra una comparativa del precio que supone el uso del transporte público frente al coche. En la parte izquierda de la gráfica se representa el coche privado y en la derecha al transporte público; mientras que en la parte superior del eje horizontal se reflejan los costes directos y en la parte inferior los costes indirectos, de los cuales no se tiene consciencia.

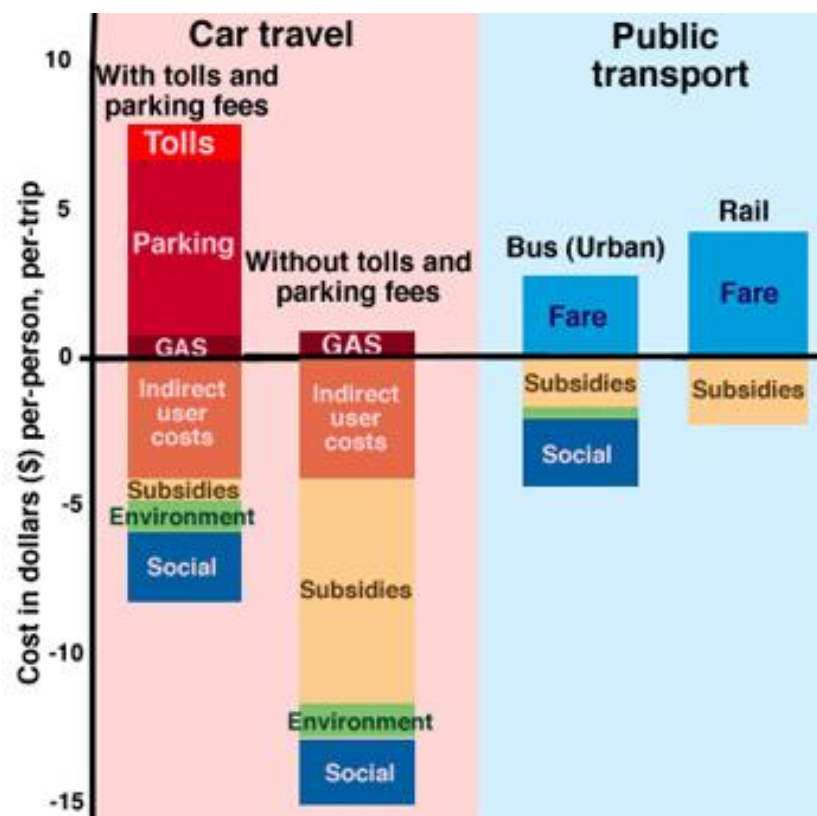


Figura 2. Costes directos e indirectos de los desplazamientos urbanos [2].

Del análisis de esta gráfica se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Los costes de desplazamientos dependen del momento y la ubicación. Por ejemplo, en hora punta el coste por el uso del coche se dispara.
- Los costes directos o visibles del coche comprenden, tan solo, el combustible y el aparcamiento. Si se tiene en cuenta que muchos parkings son gratuitos y están subsidiados, esto pasaría a ser un coste marginal.
- Mientras tanto, el coste indirecto, conformado por el coste social, medioambiental y las subvenciones, son pagados por toda la población. Un ejemplo de ello es la congestión y la polución causada por el tráfico, el ruido continuo en las ciudades, etc.

De forma general, en los usuarios influye, a la hora de elegir el modo de transporte, los costes directos, al ser los costes visibles. Sin embargo, esta es una percepción ficticia de la realidad, provocando que la competencia entre el vehículo privado y el transporte público sea inviable.

En este punto es importante volver a recordar el problema que supone el transporte privado con su individualidad - la media de coches por personas suele ser de 1 - para que una ciudad sea sostenible en el tiempo. Mientras tanto, el transporte público es un transporte de masas, donde siempre se va a aumentar la eficiencia de dicho transporte.

Punto de equilibrio Transporte Público – Coche

A pesar de las conclusiones obtenidas de la Figura 2, esto no quiere decir que el uso del transporte público sea el único modo de transporte viable para la población de una ciudad. Existe un punto de equilibrio entre el uso del coche y el uso del transporte público.

En la FIGURA 2, se explica en qué casos es más conveniente el uso de un modo de transporte frente al otro, en función del número de viajes y del tiempo de desplazamiento.

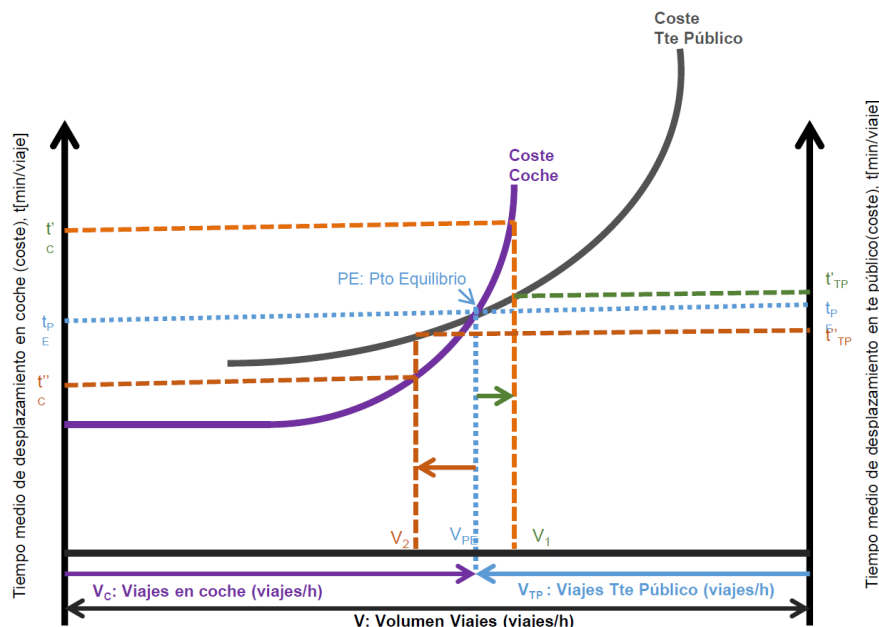


Figura 3. Punto de equilibrio entre el transporte público y el coche.

En la gráfica se observan dos curvas: una referente al coste del coche y otra referente al coste de desplazamiento. La zona izquierda de la gráfica hace alusión a cuando el número de viajes es muy reducido. En esta zona prima el vehículo privado, ya que se suelen tratar de viajes puntuales, donde un transporte colectivo carece de sentido. Según se avanza en el gráfico hacia la derecha, aumenta el número de viajes, por lo que, a partir de cierto punto, es el transporte público la opción viable.

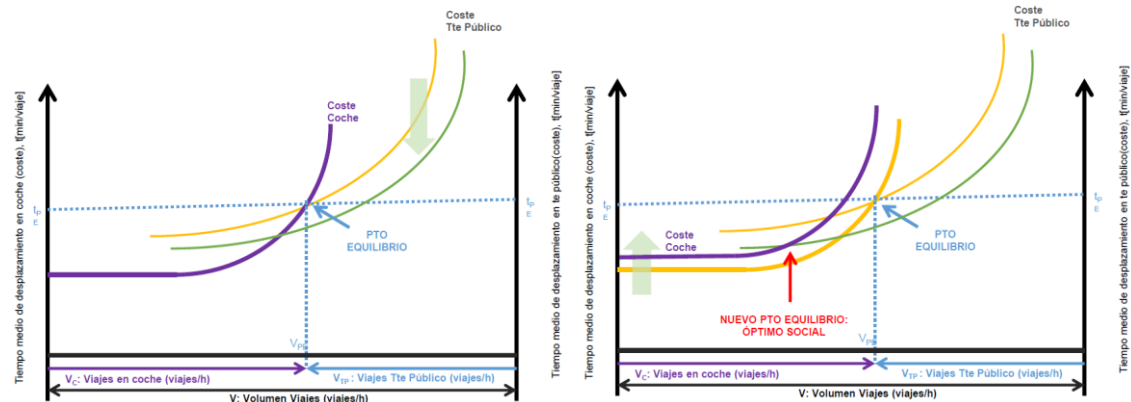


Figura 4. Desplazamiento del punto de equilibrio incentivando el transporte público y desincentivando el coche.

En las siguientes gráficas Figura 4, se puede apreciar cómo, si se incentiva el transporte público de manera que el coste para el usuario sea menor, la curva del transporte público desciende. Una manera de lograr la bajada de esta curva es mediante subvenciones, como por ejemplo el actual abono 20x20 para jóvenes.

A su vez, si se desincentiva el uso del vehículo privado, a través de distintos métodos, la curva del coste del coche ascendería. Esto se lograría mediante un aumento de la tasa anual, restricciones de acceso a centros urbanos o pagos por aparcamiento.

De esta forma, se obtiene un nuevo punto de equilibrio, donde el coste, tanto para los usuarios del vehículo privado como para los usuarios del transporte público, decrece.

2.1.3 Análisis de los modos de transporte público

Como se ha explicado en los apartados anteriores, la tendencia del segmento “Mass Transit” es a necesitar sistemas capaces de abarcar un gran volumen de personas, así como extensión de terreno dentro de las zonas urbanas. Es por eso por lo que los trenes de Cercanías se presentan como la solución principal para acompañar de una forma eficiente y sostenible este crecimiento de los núcleos urbanos.

En la estrategia de movilidad de una ciudad hay muchos factores para tener en cuenta. Los requisitos para conseguir dar un buen servicio son complejos de identificar y variados. En ocasiones, se necesita más de un modo de transporte para cubrir un determinado itinerario. Y, a veces, conviven varios modos provocando una pérdida de eficiencia.

En los siguientes apartados se van a comparar los diferentes modos en términos de fiabilidad, consumo, respeto al medio ambiente y accesibilidad, entre otros factores analizados. De esta forma, se va a clarificar por qué el ferrocarril es el modo de transporte óptimo frente a los modos de transporte público de carretera.

Demanda

La demanda es el factor más importante a la hora de definir cuál es el modo de transporte óptimo. Es muy difícil deducir y/o averiguar cuál va a ser la demanda y cómo se modeliza por las siguientes razones:

Puede sufrir fluctuaciones notables a largo plazo:

Una buena oferta de transporte puede acabar por tener un efecto inductor que provoque su aumento, y, por consiguiente, un desajuste del sistema. Aunque, las ciudades son sistemas

normalmente muy estables y es muy difícil que aparezcan demandas de determinados modos de transporte que descompensen la situación.

También, tiene fluctuaciones a corto plazo:

La necesidad de transporte varía mucho según la hora del día y según el día de la semana.

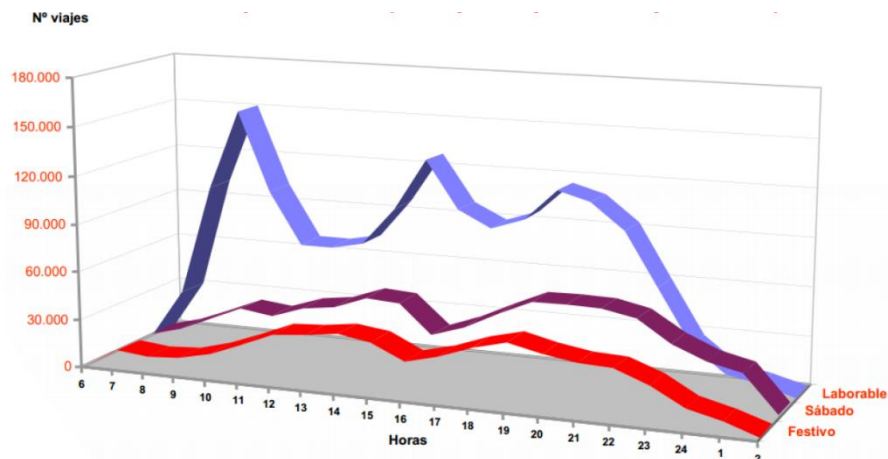


Figura 5. Pasajeros por hora y sentido [pphs] en día laborable, sábado y festivo [3].

Es muy difícil de calcular:

Existen muchas formas complejas de obtener resultados más o menos fiables. En este proyecto para comparar entre modos de transporte se va a utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Capacidad de transporte.

$$\text{Capacidad de transporte} = \frac{\text{Capacidad}_{\text{máx}}^*}{\text{Unidad}} \cdot \frac{\text{Nº Unidades}_{\text{máx}}}{\text{Hora}}$$

Capacidad máxima:

$$\text{Capacidad}_{\text{máx}} = \text{Superficie de la unidad [m}^2\text{]} \cdot \text{Peso añadido [pasajeros/m}^2\text{]}$$

Superficie de la unidad [m²]:

Limitada por la infraestructura. La longitud del andén es la que define la longitud del vehículo, y el gálibo la que define el ancho de éste.

Peso añadido [pasajero/m²]:

AW por sus siglas en inglés (Added Weight); es definido por cada administración.

Tabla 2. Pesos añadidos según zona geográfica.

Peso añadido [pax/m ²]		América	Europa	Asia
AW0	Peso en vacío	-	-	-
AW1	Peso con pasajeros sentados	2	2	2
AW2	Peso con carga media (en hora punta)	4	4-5	5-6
AW3 ¹	Peso con carga excepcional (1 de cada 100 sucede)	6	6-7	8

Para los cálculos de las capacidades de la siguiente tabla, se considera un estado de carga AW3 con 6 pasajeros por metro cuadrado.

¹ AW3 es un estado de carga utilizado solo en el ámbito ferroviario.

A continuación, en la siguiente tabla (Tabla 3) se comparan los distintos modos de transporte, en función del número de pasajeros por hora y sentido.

Tabla 3. Capacidades máximas de transporte dependiendo del modo [4].

Modo de transporte	Fabricante	Modelo	Capacidad sentados	Capacidad de pie	Capacidad máx.	Nº Unidades/Hora ²	pphs
Transporte de carretera							
Autobús urbano	Mercedes	Citaro	44	36	80	60	4.800
Autobús articulado	Mercedes	Citaro GÜ	71	56	127	60	7.620
Autobús interurbano	Mercedes	Intouro L	71	50	121	60	7.260
Transporte ferroviario							
Tranvía	Alstom	Citadis	48	244	292	40	11.680
Metro	Alstom	MIP89	242	478	720	40	28.800
Cercanías	Alstom	MI09	474	826	1300	30	39.000

Los resultados obtenidos evidencian lo anteriormente mencionado: existe una ventaja clara en términos de demanda del transporte ferroviario sobre el transporte terrestre. De todos los modos de transporte del segmento “Mass Transit” el Cercanías es el más potente desde este punto de vista, al ser el transporte que más pasajeros por hora y sentido es capaz de transportar, seguido por el metro y el tranvía.

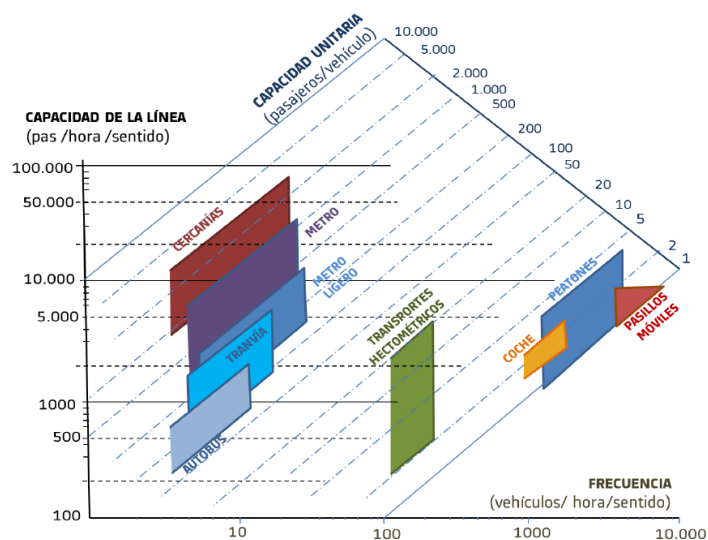


Figura 6. Comparación de diferentes modos de transporte según capacidad unitaria, de línea y frecuencia de paso.

La Figura 6 es una gráfica logarítmica en la que se puede observar los diferentes modos de transporte representados según tres parámetros: capacidad de la línea (pphs), capacidad unitaria y frecuencia de paso. Existen “solapes” entre Modos de Transporte, pero aun así hay condiciones para los que valen solo un determinado modo. Se puede distinguir como el Cercanías ofrece mayor capacidad de transporte con un menor número de vehículos.

² En el Nº de Unidades/Hora del transporte ferroviario hay que tener en cuenta que suele operar en doble composición en situación de máxima capacidad.

Disponibilidad

Para que la movilidad no se vea perjudicada en las ciudades, hay que evitar a toda costa que se colapse o se sature. Un modo de transporte público se debe caracterizar por una alta fiabilidad. A mayor número de personas que transporta, más fiable tiene que ser el transporte. En este sentido, el Cercanías será la modalidad que tendrá que invertir más en materiales más duraderos y que requieran menos mantenimiento, entre otras soluciones.

A parte de la fiabilidad a corto plazo, el modo de transporte debe responder con una disponibilidad a largo plazo. Una demanda no satisfecha es muy peligrosa. La saturación en un sistema de transporte empieza a generar inmediatamente incidencias, caos y aumento del fraude. Como consecuencia se degrada el servicio, lo que lleva a una pérdida de usuarios que huyen buscando otras alternativas y más dificultad para fidelizar nuevos.

El transporte de carretera soluciona estos problemas de demanda introduciendo un mayor número de unidades, conduciendo a esta saturación del sistema. Por el contrario, los modos de transporte ferroviarios poseen modularidad, una característica elegante con la que logran adaptarse a los cambios de demanda.

Ejemplo de ello es la venta por módulos del Citadis o del CIVIA. En primer lugar, el fabricante vende un módulo de tranvía de 30 m o composiciones de 3 coches, dependiendo del caso. Si el producto resulta exitoso y genera más demanda en el sistema, se abre la opción de comprar un módulo de mayor longitud (40 m) en el caso del tranvía, o incluir uno o dos coches más en el caso del tren de Cercanías.

Tipo de trayecto

En la Tabla 4 se puede observar los diferentes modos de transporte público en función de la distancia recorrida, la frecuencia de paradas y la velocidad máxima. Si se comparan el autobús urbano con el tranvía para una misma distancia recorrida y frecuencia de paradas, se vuelve a percibir como el transporte ferroviario ofrece una mejor capacidad que el transporte por carretera. Lo mismo ocurre entre el autobús urbano y el Cercanías.

Tabla 4. Tipo de trayecto según el modo de transporte.

Modo de transporte	pphs	Distancia recorrida [km]	Frecuencia de paradas [km]	Velocidad máxima [km/h]
Autobús urbano	< 5.000	4-17	0,325-1	50
Tranvía	< 15.000	5-15	0,5-1	70
Metro	< 30.000	10-30	0,8-1,5	80-100
Trem Tram	< 5.000	20-50	0,5-2	100
Autobús interurbano	< 8.000	30-60	1-2	100
Cercanías	< 60.000	30-60	3-10	120-140
Regional	< 10.000	60-200	5-20	160
Media distancia / Intercity	< 5.000	150-500	30 <	160-200

La decisión de construir una infraestructura ferroviaria fija conlleva una inversión muy grande, en comparación con la flexibilidad que ofrece el autobús al utilizar infraestructuras existentes. Por tanto, se debe estudiar y profundizar más en este factor ya que los recursos son limitados.

Existen ejemplos de líneas donde la distancia total recorrida y el número de paradas podría ser abordada por dos modos de transporte diferentes. Pero no siempre el diseño de la red es compatible para ambos modos.

Un ejemplo de ello es el “Metro de Sevilla”, proyectado para un metro pesado con una infraestructura de túneles y estaciones bajo tierra. Se esperaba una fuerte demanda que amortizase la gran inversión que supone construir este tipo de redes subterráneas. Además, se llegaron a instalar subsistemas de coste elevado propios de redes metropolitanas, como puertas de andén anti-arrollamiento.

Sin embargo, no se consiguió el objetivo marcado. La inversión se vio limitada y solo quedó presupuesto para adquirir unidades de material móvil tranviarios. Este tipo de material rodante no es capaz de responder a grandes demandas con frecuencias muy altas debido a la velocidad limitada que pueden desarrollar, como se ha visto en la Tabla 4. Actualmente, se encuentran explotando esta red, ofreciendo un servicio lejos de ser un transporte de masas. El resultado es bastante negativo ya que la red tiene un uso que poco a poco va decreciendo.

Coste

En este punto es importante destacar dos aspectos:

- El metro y el tranvía utilizan una vía dedicada exclusivamente para ellos. Esto permite su automatización, pero a su vez conlleva un mayor coste de inversión.
- Por otro lado, el Cercanías circula por una vía general, de uso compartido incluso con trenes de mercancías, por lo que la amortización de la infraestructura es mejor y el coste global es menor.

La mayoría de los modos de transporte público se encuentran subvencionados por el estado, ya que son servicios deficitarios, como se ha visto anteriormente. En la Tabla 5 se puede observar cómo sistemas como el metro de Sevilla o el tranvía de Barcelona han sido subvencionados excesivamente. Sin embargo, no hay que olvidar en este punto que el vehículo privado también se encuentra subvencionado de una forma indirecta y no visible para la mayoría de la población.

Tabla 5. Ingresos y costes de los sistemas de transporte público en 2017 [1].

	Modo de transporte	Ingresos tarifarios (M€)	Subvención (M€)	Otros ingresos (M€)	Total ingresos (M€)	Costes operación (M€)	Ratio de cobertura (%)	% Subvención sobre costes operación
Madrid	Bus urbano capital	251,18	224,77	n.d	475,95	475,95	53%	47%
	Otros buses urbanos			n.d				
	Bus metropolitano	181,45	292,40		473,85	473,85	38%	62%
	Metro	426,37	422,82	n.d	849,19	849,19	50%	50%
	Metro ligero	7,51	123,51	n.d	131,03	131,03	6%	94%
Barcelona	Bus urbano capital	146,60	148,17	n.d	294,77	n.d.	n.d.	n.d.
	Otros buses urbanos	23,10	n.d	n.d	23,10	n.d.	n.d.	n.d.
	Bus metropolitano	133,90	129,03	228,21	491,15	n.d.	n.d.	n.d.
	Metro	259,00	54,17	n.d	313,17	n.d.	n.d.	n.d.
	Tranvía	14,31	47,73	n.d	62,04	n.d.	n.d.	n.d.
	FGC	77,02	50,86	n.d	127,88	n.d.	n.d.	n.d.
Valencia	Bus urbano capital	43,65	65,34	n.d	108,99	102,65	43%	64%
	Bus metropolitano	10,40	1,05	n.d	11,45	11,20	93%	9%
	Metro	41,30	n.d	n.d	41,30	49,89	83%	n.d
	Tranvía	6,26	n.d	n.d	6,26	15,00	42%	n.d
Sevilla	Bus urbano capital	54,12	49,23	6,74	110,09	106,82	51%	46%
	Otros buses urbanos ¹	0,01	0,00	0,03	0,04	0,03	42%	0%
	Bus metropolitano	n.d	n.d	n.d	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Metro	15,82	46,42	0,59	62,83	17,36	91%	267%
	Tranvía	n.d.	0,00	3,93	3,93	6,43	n.d.!	0%

También cabe destacar que los sistemas ferroviarios, en comparación con el transporte por carretera, tienen una mayor tasa de fraude debido a que se tratan de sistemas más abiertos. En todos ellos, el fraude supera una tasa del 10% sobre el total de pasajeros, siendo el tranvía la modalidad más afectada.

Eficiencia energética

La demanda de energía de una ciudad alcanza niveles estratosféricos. Es por eso por lo que todos los sistemas que lo forman como el transporte público, deben de priorizar como uno de sus objetivos principales el consumo mínimo de energía.



Figura 7. Emisiones de CO₂ por pasajero.

Uno de los factores que convierte al ferrocarril en el sistema principal de la estrategia de movilidad en una ciudad es su eficiencia energética debido a su bajo consumo por persona transportada respecto a otros sistemas de transporte.

Esta evidencia se puede encontrar en la Figura 7 y la Tabla 6.

Tabla 6. Consumo equivalente en L de gasolina por pasajero*100 km [3].

Medio de transporte	Fuente	Ocupación media real	Consumo real (ocupación media)	Consumo teórico (ocupación máxima)
Metro y Tranvía	BBG	21%	1,7 l	0,4 l
Autobús	BBG	21%	2,7 L	1,2 L
Tren cercanías de DB	FES	30%	2,3 l	0,7 L
Automóvil	FES	1,7 persona	6 L	2,4 L
Avión (250 km)	FES	66%	10,5 L	6,9

Con la finalidad de ser lo más eficientes posibles, se justifica en la Figura 8 la importancia que tiene indagar en estudios de reducción del consumo de energía del tren respecto a otros aspectos como el mantenimiento o el precio inicial. Se evidencia en el gráfico de barras de la derecha (SRR) donde la energía supone un 40% del coste total a lo largo del ciclo de vida del tren (durante 30 años). También, a partir del gráfico circular de reparto de consumos del tren se obtiene la conclusión de que la cadena de tracción es donde se debe de perseguir más esta reducción de consumo energético.

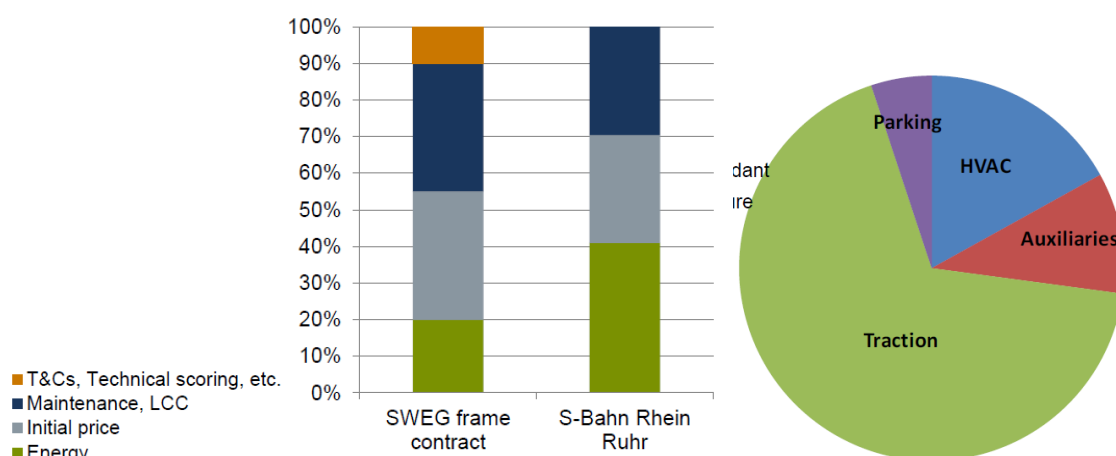


Figura 8. Costes a lo largo del ciclo de vida de un tren (30 años).

Tiempo de trayecto

En la Tabla 7 se realiza una comparación entre los distintos modos de transporte según los servicios que ofrecen: baños, tasa de confort, Wifi e información al pasajero. Se puede observar cómo el tren de Cercanías desarrolla todos los servicios, quedándole pendiente la inclusión de Wifi en muchas unidades del mercado. Actualmente, la experiencia del pasajero es un factor altamente importante, por lo que es primordial incluir todos los servicios mencionados y, además, desarrollar nuevos.

Tabla 7. Servicios de cada modo de transporte según el tiempo de trayecto.

	Autobús urbano	Tranvía	Metro	Trem Tram	Autobús interurbano	Cercanías	Regional	Intercity
WC	✗	✗	✗	✗	~	✓	✓	✓
Tasa de confort ³	Baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta	Total	Total
Entretenimiento	✓	✗	✓	~	✓	✓	✓	✓
Wifi	✓	✓	~	~	~	~	✓	✓
Información al pasajero	Continua	Continua	Continua	Regular	Regular	Regular	Puntual	Puntual

La certidumbre del pasajero sobre el tiempo de trayecto de un modo de transporte es un aspecto muy importante que considerar. Los sistemas ferroviarios parten con la ventaja de no depender del tráfico, por lo que sus vías no suelen sufrir congestiones y, por lo tanto, pueden ser más fidedignos a sus horarios.

Accesibilidad

Todos los medios de transporte están alineados para conseguir la mejor accesibilidad posible. Aún así se encuentran muchas soluciones que les falta mucho por mejorar en este aspecto, como por ejemplo, los autobuses interurbanos donde la subida por rampa (en caso de tenerla) de una persona en silla de ruedas puede llegar a suponer una maniobra entre 5-8 minutos.

Según el Plan de Accesibilidad Integral 2018-2026 de Renfe, este factor consiste en dotar de accesibilidad universal a toda la “cadena de viaje”, para que los usuarios del tren puedan llegar sin obstáculos desde el acceso a la estación de origen y el interior del tren hasta la llegada a destino, facilitando la intermodalidad, hasta que los viajeros abandonen la estación.

Con este plan se pretende conseguir la excelencia en la prestación de los servicios ferroviarios, tanto en AVE y Larga Distancia, como en Media Distancia y Cercanías.

El plan también incluirá la universalización de la accesibilidad a los servicios, en colaboración con otras entidades, instituciones y agentes sociales expertos, así como mejorar las prestaciones de los servicios a las personas con discapacidad, con movilidad reducida y dificultades en la comunicación. La finalidad será conseguir un ferrocarril accesible, que proporcione autonomía a las personas con discapacidad o movilidad reducida dando cumplimiento a la legislación vigente.

Más normativas relacionadas del ámbito ferroviario son: Real Decreto Legislativo 1/2013, Reglamento (UE) N° 1300/2014 de la Comisión, AODA (Accessibility for Ontarians with Disabilities Act)...

³ Tasa de confort = [pasajeros sentados / pasajeros totales]

Fidelización del usuario

Este factor solo lo consiguen los modos de transporte que logran hilar muy fino, es decir, que no se limitan a transportar, sino que invierten en investigar a sus usuarios sobre qué es lo que más requieren. Además, este es un punto importante en la lucha contra el coche privado. Deben intentar atraer a los usuarios y disuadir a estos de la utilización de los vehículos privados en sus desplazamientos.

Para lograr esta fidelización, se están desarrollando e investigando, sobre todo, en términos de puntualidad, capacidad, experiencia de pasajero, fiabilidad y seguridad.

Anteriormente, se ha hablado de los cuatro primeros requerimientos; a continuación, se desarrollará el último de ellos.

Seguridad

La seguridad puede ser entendida de dos formas: bien en términos de tasa de accidentabilidad y en términos de seguridad percibida.

Es bien conocido que el transporte por carretera tiene una alta tasa de accidentabilidad, especialmente el coche. Por el contrario, el modo de transporte ferroviario es mucho más seguro: al viajar en tren, el riesgo de sufrir un accidente se ve reducido en 1/30 en comparación con el transporte terrestre.

Por otro lado, se encuentra la seguridad percibida, la cual es muy solicitada a nivel usuario. Los modos de transporte en superficie y aquellos donde el maquinista o conductor se encuentra visible al usuario transmiten mayor sensación de seguridad. Los modos ferroviarios investigan la forma de ser lo más seguros posibles, mediante cámaras y sistemas de alarma inteligentes, debido a la limitación derivada de su longitud.

Emisiones

Tanto los operadores como los usuarios se encuentran correctamente penalizados con motivo de la lucha contra la reducción de emisiones de efecto invernadero. Todos ellos se están viendo limitados en sus actividades y, gracias a esto, se está consiguiendo que la gente reflexione.

La intención de conseguir que un porcentaje alto de la población tenga entre sus valores el respeto al medioambiente se está logrando en muchas ciudades europeas. El resto de las ciudades están dejando pasar esta oportunidad de educar a la sociedad en algo bueno. Los núcleos urbanos que no están impulsando este respeto con ímpetu, suelen corresponderse con las ciudades que subvencionan el transporte privado – indirectamente - como único medio, tal y como se ha visto en el apartado 2.1.2.

En general, si se hace una comparación a escala entre los operadores y los usuarios de coche privado, se encuentra un nivel normativo y de penalización mucho más exigente sufrido por el primero. Aun así, la excusa es que los operadores son públicos y por eso deben de estar obligados a cumplir con las restricciones. El pensamiento de que lo público es lo que tienen que respetar todos, y no viceversa, está haciendo mucho daño en la movilidad.

Por otro lado, por ahora la sensibilidad medioambiental del pasajero no interviene tanto como se quisiera en la decisión sobre qué modo de transporte le conviene más en el día a día. Sin embargo, cada vez este respeto por el medio ambiente se está desarrollando más y más en las nuevas generaciones y se está convirtiendo en uno de los pilares más fuertes del transporte ferroviario. La cantidad de campañas y restricciones a nivel usuario que están aconteciendo en Europa hace que la realidad cada vez esté más cerca del ciudadano.

Cabe destacar que más allá del hidrógeno y de las nuevas tecnologías que contaminan menos en destino, el punto principal en cuanto a reducción de emisiones y respeto al medio ambiente está en conseguir atraer pasajeros del transporte en carretera al transporte ferroviario, tal y como se viene mencionando en los apartados anteriores.

En la Figura 9 se puede observar como el conjunto de transportes es la segunda fuente de emisiones de efecto invernadero en países como E.E. U.U. Es más, de este conjunto de transportes el transporte de pasajeros por carretera supone más de la mitad de las emisiones.

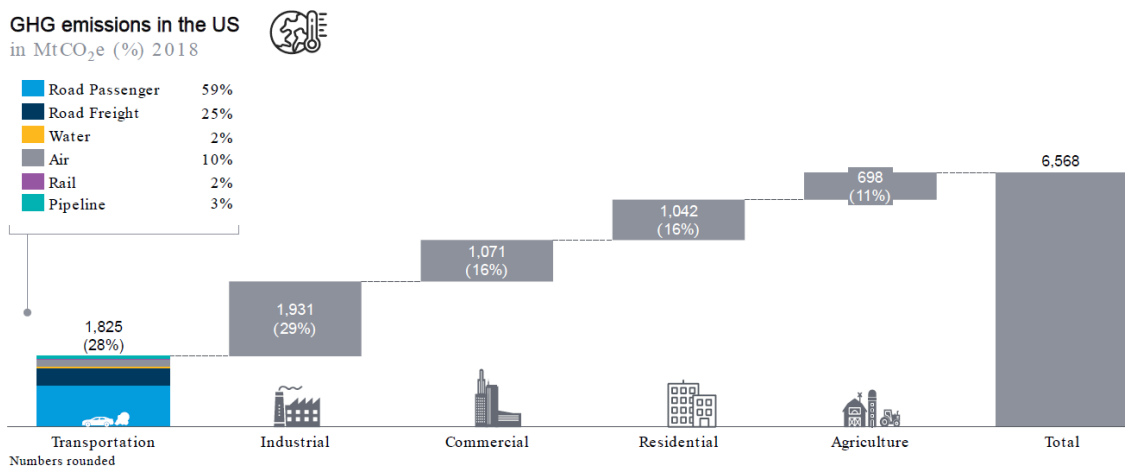


Figura 9. Emisiones de efecto invernadero en E.E.U.U.

El cambio modal al ferrocarril puede reducir considerablemente las emisiones ya que el aumento del porcentaje de emisiones no sería para nada proporcional. Es un motor clave para descarbonizar la industria del transporte en general, al tiempo que proporciona una oportunidad de crecimiento para la industria de suministro ferroviario.

Es decir, si utópicamente se consiguiese pasar un 30% de los usuarios del transporte por carretera al ferrocarril, lo más seguro es que el porcentaje de emisiones de este último no se viese alterado.

Inserción urbana

Cuando se habla de inserción urbana, se suele pensar en la problemática que conllevan los transportes por superficie, como el autobús o el tranvía. Estos modos de transporte que suelen convivir a la vez derivan en las siguientes consecuencias: una mayor saturación de la red de carreteras, la competencia entre modos, aumento de la confusión y reducción de la usabilidad. En definitiva, una pérdida de eficiencia del sistema.

Sin embargo, el tren de Cercanías no sufre los mismos problemas y, además, es una herramienta poderosa de reinversión de las ciudades. Soterrar las líneas de Cercanías está siendo una nueva tendencia que está cambiando el concepto de ocupación de la superficie, al hacer desaparecer las divisiones que provocan dentro de una misma ciudad. Un ejemplo de ello es la línea RER A de París.

Indirectamente, los modos de transporte ferroviarios poseen un mayor potencial de aportar una función social a su entorno, permeabilizando barrios degradados. Por ejemplo, en Badalona esto se logró a través de la construcción de una línea tranviaria que regeneró la zona de Sant Adria.

2.2. Estado del arte: CERCANÍAS

Una vez analizadas las razones por las cuales el transporte urbano es necesario y cómo, para la estrategia de movilidad para las ciudades, los trenes Cercanías se presentan como sistema principal, en los próximos apartados se procede a analizar todo lo relacionado con este modo de transporte. Este estudio se realiza con la finalidad de estudiar en profundidad, desde su concepto hasta sus necesidades principales, así como encontrar nuevas líneas de investigación.

2.2.1 Evolución del Concepto

Si se indaga en la historia de cualquier ciudad de Europa donde ha ido creciendo la red de Cercanías, se puede observar una cierta similitud en la evolución del concepto.

Al principio, cuando se empezaron a construir las primeras líneas, las cuales son origen de las actuales, los Cercanías se concebían como un transporte que iba de una estación A a otra estación B. Algunos ejemplos de ello son, en Madrid, las siguientes líneas: Atocha-Aranjuez, Atocha-Guadalajara, Príncipe Pío-Villalba-El Escorial-Ávila...

Posteriormente, esas pequeñas líneas fueron evolucionando hasta convertirse en redes complejas, en mallas de líneas que, o bien unen de extremo a extremo los grandes núcleos urbanos pasando por el centro, o bien unen periféricamente grandes puntos de mucha población.

Actualmente, desde el punto de vista civil, la tendencia es a soterrar las vías, como se ha mencionado anteriormente, para facilitar la movilidad en el entorno urbano. La fiabilidad y la eficiencia energética son dos características que se han ido desarrollando y asumiendo históricamente por el tren de Cercanías. Debe tomar esta responsabilidad, al tratarse de un transporte masivo, evitando cualquier tipo de colapso y siendo el transporte con menor consumo energético por persona transportada.

La sensación generalizada que hay del tren de Cercanías, en comparación con el tren de alta velocidad, es que parece de un nivel inferior. Sin embargo, este primero también tiene unas exigencias muy altas de fiabilidad, como se ha mencionado en el párrafo previo. Entre otras cosas con un mantenimiento correcto y exhaustivo se consigue evitar averías que, como se ha visto en apartados anteriores, suponen el colapso de una ciudad entera.

Desde el punto de vista operacional, y en relación con la estrategia de movilidad que están tomando las ciudades de posicionar al ferrocarril como núcleo del sistema, el tren de Cercanías busca mejorar, cada vez más, en términos de capacidad y accesibilidad. En relación con este último término, la población ha sufrido un envejecimiento de forma global, necesitando medios de transporte que faciliten su uso y acceso.

El último concepto en el que el Cercanías está adentrándose más es en las mejoras relacionadas con la experiencia del pasajero. El centro de la operación ha pasado a ser el usuario.

En esta evolución cabe destacar que los avances no siempre han sido a partir de la mejora del Cercanías como material rodante, sino que a través de agentes externos pertenecientes al sistema. Por ejemplo, la introducción del Abono de Transportes supuso un crecimiento de la demanda muy significativo. Poder usar el mismo título de transporte para realizar viajes intermodales ilimitados por periodo de un mes o de un año en una determinada zona, proporciona una gran flexibilidad y comodidad a los viajeros.

En resumen, se agrupan los atributos y necesidades que se encuentran en los actores principales del sistema: operador o usuario, para así tener una visión global del sistema.

Operador

La operación se caracteriza por ser:

- En base a unos horarios fijos. A diferencia del metro que opera por intervalos, aunque tenga una tabla horaria por detrás.
- Poseer tarifas escalonadas de acuerdo con la distancia a recorrer.
- Compartir una misma infraestructura con trenes regionales y de mercancías. Lo que supone una amortización a largo plazo de las líneas.
- Muy variada: operación a temperaturas extremas (+50 °C—15°C) y operación en túnel.
- Tener unas tasas de vandalismo muy altas.
- Incapaz de cubrir los costes de explotación a pesar de las subvenciones.
- Buena optimización de costes para poder salvar la diferencia de capacidad entre las horas pico y valle. A su vez un buen dimensionamiento del parque con el objetivo de cubrir la demanda en las horas pico, y bajar lo posible la infrautilización del de material móvil.

En conformidad con los atributos que busca el operador se pueden distinguir:

- Máxima disponibilidad a través de un buen plan de mantenimiento preventivo.
- Máxima fiabilidad, como se había comentado en párrafos anteriores y en relación con el mantenimiento predictivo, se busca a través de sistemas redundantes evitar las averías.
- Máxima seguridad en la circulación, tanto activa como pasiva, de los pasajeros y maquinista.
- Mínimo consumo energético posible por viajero en función de los kilómetros recorridos.
- Máximo respeto al medio ambiente altamente relacionado con el punto anterior.
- Coste de mantenimiento reducido, es decir, se debe intentar conseguir una alta disponibilidad y fiabilidad, sin perjudicar el coste de mantenimiento.

Por último, se recogen todos los retos que quedan por seguir mejorar en la operación:

- Unión del centro de los grandes núcleos urbanos con las periferias en un tiempo inferior a 60 min. Es una necesidad de las personas que deben acudir a trabajar a la periferia, y, además, aporta valor a la ciudad al interconectar con zonas industriales y aeropuertos.
- Capacidad de adaptación al aumento de la demanda a través de composiciones modulares y polivalentes. Siempre que un sistema tenga éxito, tenderá a la saturación. Por lo tanto, es muy importante buscar formas que desaturen esta demanda sin afectar al servicio.
- Ser capaces de ser flexibles, y por consiguiente, prestar servicios en el centro de las ciudades, respondiendo a una alta densidad, y simultáneamente suministrar servicios de calidad para la baja densidad de los extrarradios.

Usuario

Por otro lado, conforme a lo que busca el usuario se distingue:

Frecuencia, regularidad y puntualidad de las circulaciones:

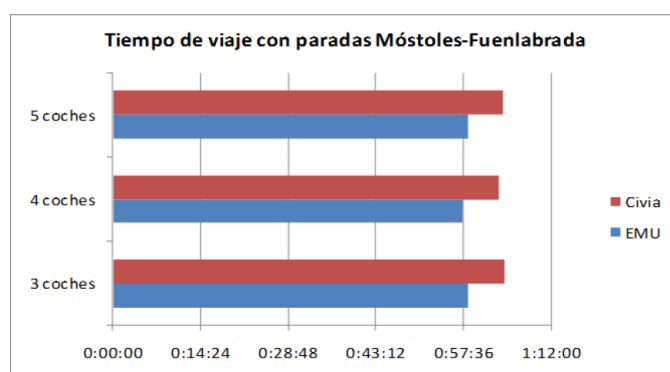
El usuario necesita aprovechar al máximo el tiempo de viaje.

Tiempo de preparación de viaje = Tiempo de Estación + Tiempo de Abordaje (Dwell time) + Tiempo de Trayecto + Tiempo de Desembarque (Dwell time) + Tiempo de Salida de Estación

Para reducir en lo posible el conjunto de sumandos, se estudia sobre todo como intervenir sobre el término del tiempo de embarque y desembarque. Se ha visto que se consiguen buenas reducciones del tiempo de parada a partir de la mejora de las siguientes características técnicas:

- tiempo de apertura y cierre de las puertas
- movilidad por la composición (ancho de pasillo, altura de piso homogénea...)
- número de puertas

Un ejemplo de ello se puede observar en la Figura 10. Los resultados obtenidos de los estudios sobre la línea Móstoles-Fuenlabrada reflejan como introduciendo un tipo de material móvil con un tiempo de apertura y cierre de puertas menor, se puede llegar a tener un 20% más de capacidad en la línea. Esto significa que, de cada 5 trenes a la hora, se podría llegar a introducir uno más.



Dwell Time(s)							
Typology	Route	Kms.	Nº Estaciones	Km/estación	CIVIA	TALGO	Delta
Commuter	Móstoles-Fuenlabrada	42,2	21	2,0	1.713	1.367	-20%
	Valencia-Castellón	73,4	18	4,1	982	855	-13%
	El Calayo-Avilés	34	13	2,6	985	734	-25%
	Valencia-Castellón (CIVIS)	73,4	6	12,2	272	240	-12%

Figura 10. Ejemplo de diferencia de tiempos de parada entre diferentes unidades de Cercanías [5].

Con este ejemplo queda demostrado cómo para la Capacidad es mucho más relevante el diseño de la subida y la bajada de los pasajeros, y el flujo dentro de las estaciones, que la reducción de los tiempos de intervalo entre trenes por mejora de sistemas de señalización.

Confort en el transporte a través de una mejora de la experiencia del pasajero. Comunicación óptima con el pasajero:

El usuario no solo pide acortar tiempos, sino que su tiempo invertido pueda convertirse en tiempo de calidad. Para ello, se están estudiando todos los elementos que puedan hacer del tren de Cercanías un lugar más agradable: iluminación, colores, ergonomía, ruido, mobiliario interior o comunicación con el pasajero.

Este último es uno de los más importantes ya que es un incentivo muy fuerte para atraer pasajeros. Por ejemplo, mantener informado al viajero de su localización y de cuánto tiempo va a tardar en hacer el recorrido y cuánto tiempo le queda es una información muy demandada, sobre todo cuando se trata de un usuario nuevo en la línea.

Máxima accesibilidad debido al envejecimiento de la población.

En términos de accesibilidad, existen ventajas claras cuando un tren tiene la altura de piso a ras del andén, o también cuando la altura de piso es la misma para todo el tren. Sin embargo, esta última característica puede verse de diferente manera en cada caso.

Por un lado, cualquier usuario entra y se queda cerca del sitio por dónde ha entrado. En relación con las personas con movilidad reducida, este comportamiento es todavía más frecuente. Es muy raro que un usuario en silla de ruedas quiera recorrerse toda la composición. Es por eso por lo que según está línea de pensamiento un piso homogéneo no sería necesario.

Por el otro lado, según el tren avanza por la línea se va dando una redistribución de pasajeros por la composición. Generalmente, la mayoría de los usuarios se suben y bajan en los alrededores de donde está su acceso a la estación. Debido a la disposición típica de estos edificios históricos, suelen encontrarse cerca de los extremos o en el centro del tren. Por lo que existe un movimiento de pasajeros continuo por toda la composición.

A razón de que el mercado está evolucionando entorno al usuario, y sabiendo que la población cada vez es más envejecida y demanda trenes más accesibles, se debe de hacer lo posible para flexibilizar esta transición. La eliminación de escalones siempre evita conflictos en este movimiento.

Todas estas características se van a analizar en el siguiente capítulo dónde se seguirá indagando las razones de por qué una solución y no otra.

2.2.2 Definición del producto

A continuación, se desarrolla cómo tiene que ser un tren de Cercanías y todas las características que lo definen, con el fin de profundizar en el porqué de cada rasgo y poder encontrar puntos de mejora.

También se analizan las interrelaciones que existen con todos los elementos del entorno: infraestructura, operador y usuario. Un tren no es solo un conjunto de coches guiados por ruedas de acero a través de carriles, alimentadas por una fuente de energía para traccionar y así transportar personas en una red de líneas ferroviarias interconectadas por estaciones, sino que pertenece a un sistema ferroviario.

Como cualquier sistema, la suma de todos los componentes y las interrelaciones que surgen entre ellos es la única forma de analizar y entender el producto al completo con todas sus necesidades.

Un ejemplo ilustrativo para entender esto es con dos trenes Cercanías que a simple vista cuentan con características muy similares. Sin embargo, cada uno ofrece servicio en escenarios muy diferentes.



Figura 11. Unidad de servicio de Cercanías de Stadler clase FLIRT (DMU izquierda, EMU derecha) [6, 7].

El servicio del primer tren es desarrollado en una red interurbana que une periféricamente grandes poblaciones. El material rodante fue diseñado para una velocidad máxima de 200 km/h y una aceleración de $a \leq 0,8 \text{ m/s}^2$. Por el tipo de servicio y separación de las estaciones se trata de un Cercanías, aunque se parece más a un Regional debido a las velocidades que alcanza y a la conexión entre ciudades que realiza.

De esta manera, el fabricante respondió a las necesidades expuestas por el operador en un pliego. Estos valores de velocidad y aceleración que determinaba el documento fueron desarrollados conjuntamente entre el operador y el administrador de infraestructura. Son frutos de años de experiencia y estudio sobre la línea, y por fin se ha conseguido un tren que satisfaga dichas necesidades.

En este caso, la velocidad lícitada es tan alta porque lo permite el trazado y la infraestructura. Y, además, porque esta red de Cercanías llega a tener tramos muy largos donde según los estudios ir más lento perjudica mucho al tiempo de recorrido y a la capacidad de la línea. Sin embargo, la aceleración no hace falta desarrollarla tanto, ya que la distancia entre estaciones es muy grande y da tiempo a acelerar y decelerar en perfectas condiciones.

El segundo tren de características aparentemente similares (composición de los coches, configuración de las puertas, distribución de la tracción...) proporciona el servicio en una ciudad muy grande donde el recorrido es sobre todo por zona urbana. En este caso, el material rodante fue diseñado para una velocidad máxima de 160 km/h y una aceleración de $a \leq 1,2 \text{ m/s}^2$.

Al tener este tren tramos más cortos, la velocidad que se puede alcanzar es menor, pero en cambio la aceleración solicitada es mayor que el caso anterior. Además, al verse reducido el tiempo que pasa el usuario en el tren se suprime la necesidad de elementos como mesas, mientras que en el tren anterior sí podrían estar.

Con esta comparación, queda reflejado la importancia de considerar al tren de Cercanías como un sistema y no como un mero vehículo, y es así como será considerado en los siguientes apartados.

Antes de empezar a analizar al tren en su conjunto – es decir, lo que le condiciona exteriormente, su arquitectura exterior y su distribución interior – se procede a comentar los dos siguientes factores: tipo de unidad y número de coches.

Tipo de unidad

Se pueden encontrar dos tipos de unidades: autopropulsadas y composiciones de coches. Al tratarse de recorridos cortos, con una alta frecuencia de paso y densidad elevada de ocupación de la vía, no es eficiente detenerse para quitar o poner coches, según proceda, con lo que supone el trabajo de acoplamiento de la locomotora. Es más eficiente una unidad autopropulsada. Ejemplo de ello es cómo se soluciona en redes convencionales en “Y”, poniendo doble composición desacoplando en un punto o bien intercalando trenes cada uno yendo a un extremo.

También, las composiciones compuestas por coches desaprovechan el espacio de andén ocupado por los acoplamientos entre vehículos. De esta manera, el número de puertas de las unidades autopropulsadas es mayor, favoreciendo así la subida y bajada de viajeros.



Figura 12. Composición autopropulsada compuesta por 3 coches de un CIVIA [8].

Número de coches

De forma general, no se suelen buscar composiciones excesivamente largas – es decir, un elevado número de coches – para lograr mantener un grado de eficiencia óptima entre las horas pico y las horas valle. En las horas pico se suele circular en composición doble, mientras que en las horas valle se suele hacer en composición simple.



Figura 13. Composición autopropulsada en doble composición de CIVIA [8].

2.2.2.1 Infraestructura

Al considerar el tren de Cercanías como un sistema y no como un mero vehículo, se deben de analizar las interrelaciones que existen con el entorno y así ver cómo le puede llegar a condicionar.

Por un lado, están las realidades específicas a cada lugar: autoridad local, marco normativo del país, estándares, procesos de certificación, hábitos específicos del operador como materiales, cálculos de cargas... Los operadores suelen tener preferencias que duran décadas. Entre estas realidades están, también, las condiciones climatológicas características del país.

Por otro lado, se encuentra el agente externo que condiciona más al tren: la infraestructura. En este apartado, se profundizará en los tres aspectos principales: la fuente de alimentación, el gálibo y el tipo de andén.

Fuente de alimentación

Comenzando por el primer aspecto mencionado, en este apartado se va a analizar qué tipos de suministro de energía existen en las redes convencionales y cómo estos suministros generan características específicas en el tren Cercanías.

Eléctrica

La tracción eléctrica es el suministro de energía más usual en la mayoría de las redes convencionales. En la Figura 14 se puede observar a nivel europeo la gran variedad de tensiones existentes, mientras que en la Figura 15 se muestran ejemplos a nivel mundial:

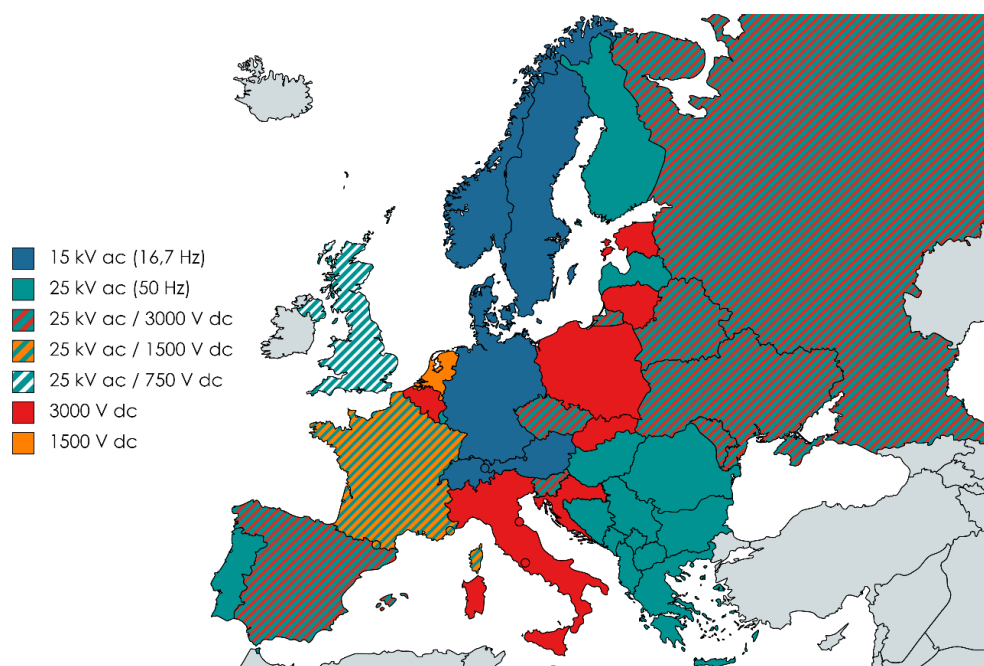


Figura 14. Tensiones de alimentación de catenaria en Europa [9].

PAÍS	TENSIÓN
India	25 kV ac (50 Hz)
China	25 kV ac (50 Hz)
E.E. U.U.	25 kV ac (50 Hz) / 12 kV ac (25 Hz)
Brasil	3000 V dc / 1500 V dc

Figura 15. Tensiones de alimentación de catenaria en otros países de gran índole mundial.

La tensión de alimentación para la que se diseña un tren de Cercanías siempre vendrá marcada por la licitación en concreto para la que se presenta la oferta. En caso de reutilizarse un proyecto de una licitación de un país para otro con una tensión distinta, el proceso de adaptación no será tan trivial y supondrá cambios relevantes dentro de la cadena de tracción.

Con este abanico de modos de electrificación se puede entender la dificultad que supone definir en un tren para qué tipo de tensiones debería de estar diseñado. Si para una sola tensión, si para más de una. La necesidad de equipos es muy diferente si la corriente es continua a si la corriente es alterna. Las prestaciones, protecciones, normativas, homologaciones, ensayos, seguridad... son muchas cosas las que cambian. Además, aunque el alcance territorial de una red convencional no es muy grande, a veces se encuentran tensiones diferentes dentro de la misma operación (en talleres, entradas a estaciones de alta velocidad...).

El coste que conlleva la construcción de una red electrificada es una gran inversión. La decisión de gastar el dinero o no depende de muchos factores. Si la demanda en las líneas se prevé que va a ser elevada, puede que sea un motivo suficiente que justifique la financiación de una infraestructura electrificada. Sin embargo, no siempre será lo más rentable.

La electrificación siempre tiene aplicación en territorio urbano o en su defecto las baterías o las pilas de hidrógeno. En cualquier caso, nunca podrá ser el diésel debido a las emisiones y la contaminación en origen.

Diésel

Este tipo de tracción solo tiene sentido cuando la línea tiene una baja densidad de pasajeros. En estos casos, el servicio es casi un tren regional que une pequeños núcleos urbanos a través de líneas con tramos sin electrificar y la tracción suele ir en un coche técnico suplementario.

Se encuentra puntualmente en ciertas zonas del planeta sobre todo en países donde no hay ningún tipo de presión por conseguir un comportamiento medioambiental. Para el resto de las redes urbanas e interurbanas de las grandes ciudades se considera una tecnología obsoleta.

Tecnologías amigables con el medio ambiente

A parte de la electrificación, se encuentran varias tecnologías de tracción que son respetuosas con el medioambiente: pilas de hidrógeno, baterías de tracción, gas licuado... Cabe destacar la importancia que tiene en el Cercanías este tipo de tecnologías, ya que promueve este transporte como medio eficiente dentro de las ciudades. Se va a centrar el análisis, únicamente en las siguientes dos tecnologías:

Baterías de tracción:

Es un sistema sencillo ya que tiene un menor número de elementos. La vida de las baterías, normalmente de litio, puede durar como mucho entre 100-120 km. Es por eso por lo que la autonomía está muy penalizada en este tipo de tecnología.

Un ejemplo de este tipo de tecnología en el mercado es el tren de Cercanías CAF que actualmente se encuentra operando en Auckland, Nueva Zelanda: 57 composiciones eléctricas de tres coches (Mc-R-Mc)⁴ de 72 metros de longitud cada una. La velocidad máxima es de 110 km/h y tiene una capacidad total de 380 pasajeros.



Figura 16. Tren de Cercanías de CAF (Auckland, Nueva Zelanda) [10].

Pila de hidrógeno + Baterías de tracción:

También conocido como sistema hibridado. Por las prestaciones que ofrece la pila de hidrógeno y al ir siempre apoyado con baterías tiene mayores autonomías que la tecnología anterior: entre 800-1000 km.

Un ejemplo de este tipo de tecnología en el mercado es el tren Coradia iLint fabricado por Alstom para el operador público alemán LNVG: 15 composiciones de tres coches (Rc-M-

⁴ Mc: Coche motor con cabina. M: Coche motor sin cabina. Rc: Coche remolque con cabina. R: coche remolque sin cabina.

Rc). Puede recorrer hasta 1.000 km con el depósito lleno y alcanzar una velocidad máxima de 140 km/h., con una capacidad de 160 pasajeros sentados.

Se considera el primer tren impulsado solo por este tipo de baterías. La electricidad para la tracción y los equipos embarcados se genera a través de una pila de hidrógeno y una celda de combustible. Se almacena en una batería y se recupera durante el frenado. Todo esto está supervisado por algoritmos de gestión de la energía, que optimizan el sistema.

Cabe destacar que Renfe apuesta por esta tecnología para sus nuevos trenes de Cercanías en su próxima licitación.

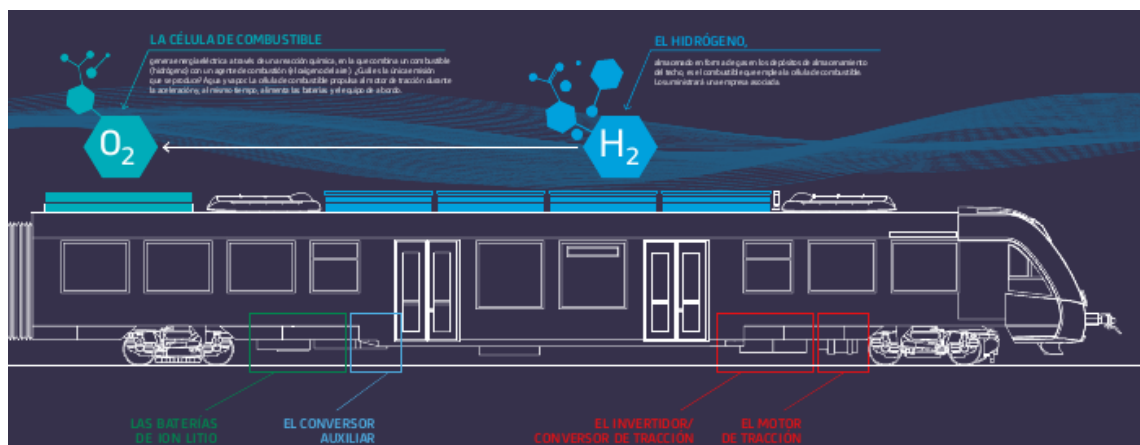


Figura 17. Tren de Alstom Coradia iLint [4].

Gálibo

En el siguiente aspecto a profundizar, el gálibo, se estudian los distintos anchos de vía así como los gálibos de caja que se pueden encontrar actualmente alrededor del mundo, para lograr tener una idea general de cómo se condicionan las dimensiones de un tren en función del país.

Ancho de vía

La variedad de anchos de vía de las diferentes administraciones de infraestructura es una realidad “inalterable” con la que se tiene que enfrentar el diseño de un Cercanías. No es lo mismo desarrollar un tren para España que para Reino Unido. Con el ancho, las características dinámicas cambian, la estructura puede cambiar, el interiorismo también...

A continuación, se puede observar a distintas escalas las diferencias en anchos de vía:

Tabla 8. Anchos de vía en España [9].

Redes	Ancho [mm]
Red Convencional	1668
Redes de Metro y tranviarias	1445
Red de Alta Velocidad	1435
Redes FEVE, FGV, FGC, SFM Metro de Bilbao, Valencia y Palma Tranvías C. Valenciana, País Vasco y Galicia	1000
Tren de Soller (Mallorca)	914

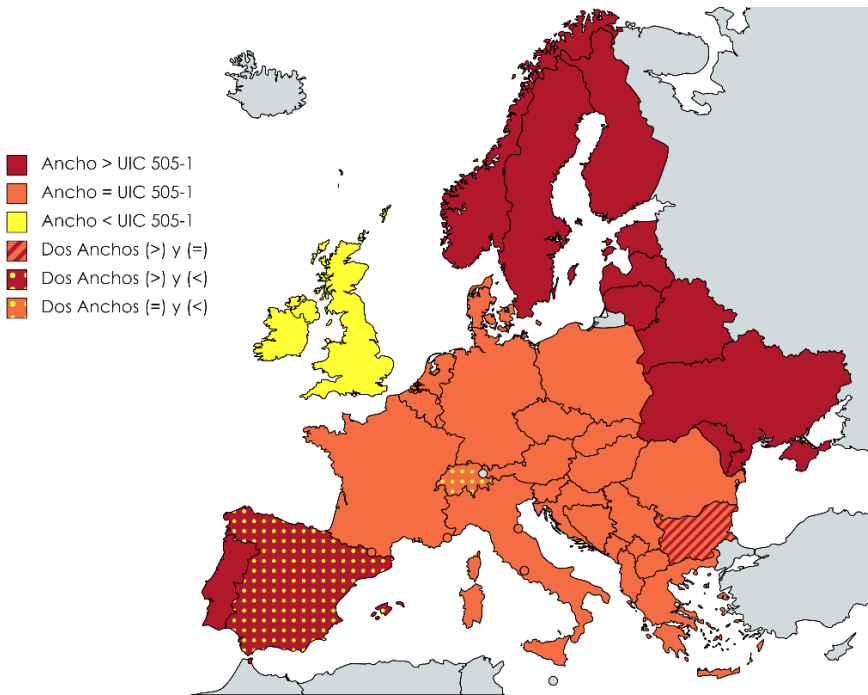


Figura 18. Anchos de vía en Europa [11].

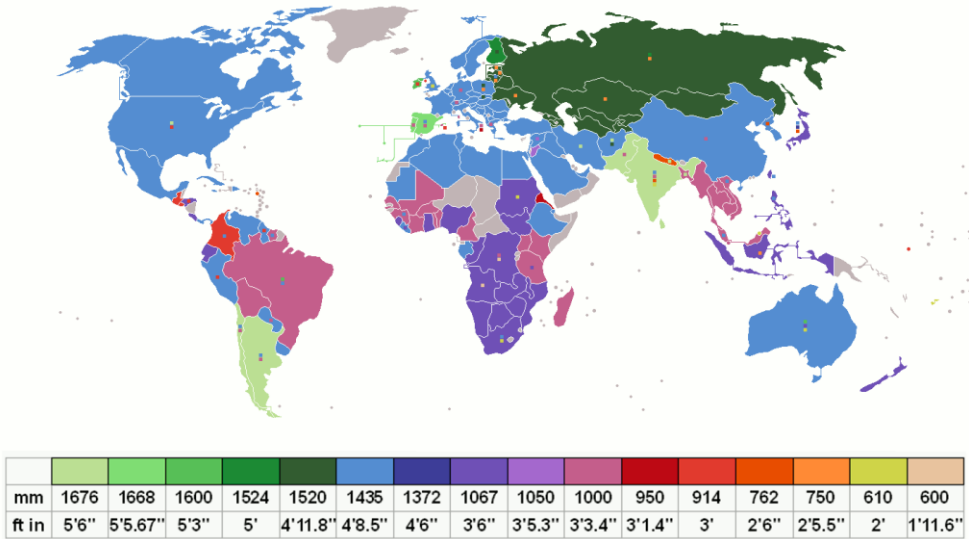


Figura 19. Anchos de vía en el mundo [11].

Gálibo de caja

El gálibo es una característica fundamental ya que condiciona todas las dimensiones de la caja. Existen infraestructuras antiguas que cuentan con gálibos “históricos”: estos son estrechos y reducidos. Sin embargo, el diseño del Cercanías no suele estar cautivo de este tipo de instalaciones antiguas como lo puede llegar a estar un metro en una red soterrada donde todo son túneles. Debido al menor número de tramos en túnel de las redes convencional, es mucho más fácil restaurar y remodelar las líneas antiguas. En este sentido, el gálibo de infraestructura cada vez está más normalizado, y, en consecuencia, el gálibo de caja de Cercanías también es más estándar.

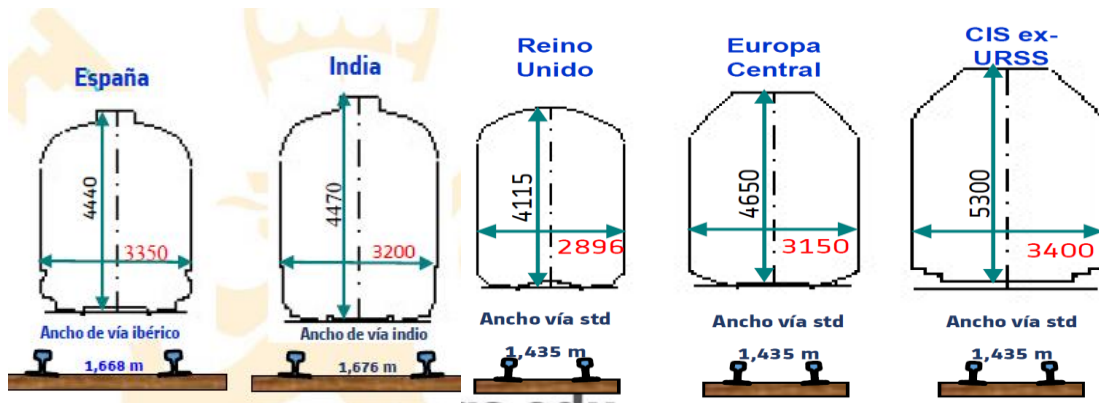


Figura 20. Ejemplos de gálibos en todo el mundo [3].

Andén

Como se ha mencionado al principio de este capítulo, el tren de cercanías es un medio de transporte fundamental para la estrategia de crecimiento urbano sostenible de las ciudades. En estas, la tendencia de la población es al envejecimiento, por lo que la facilitación del acceso a los pasajeros desde el andén es fundamental.

Este último aspecto tiene una relación estrecha con el andén. En las redes metropolitanas, la altura del andén es homogénea en todas las líneas. Sin embargo, en las redes Cercanías no se encuentra una uniformidad. Esto conduce a la problemática del diseño de los trenes de cercanías, característica solo en este tipo de sistema ferroviario.

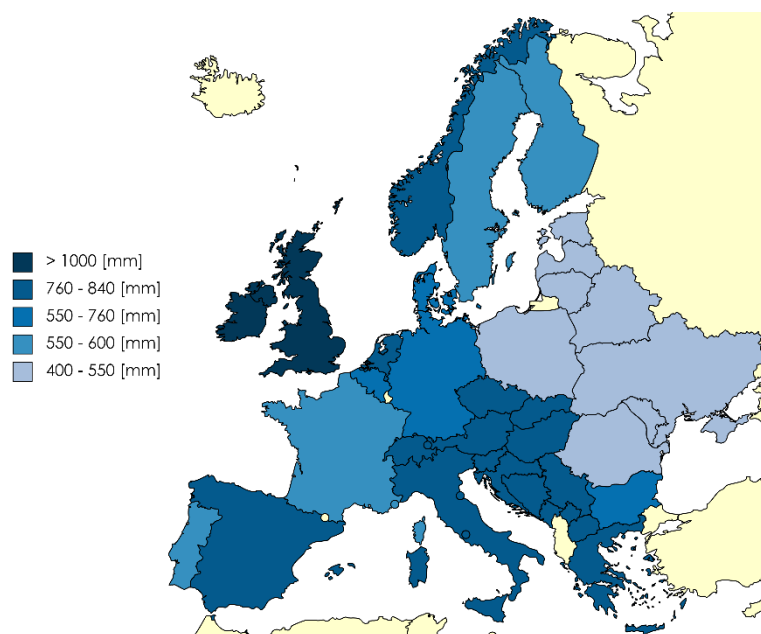


Figura 21. Diferentes alturas de plataforma en Europa.

La altura de la plataforma, característica de cada red de infraestructuras local, debería coincidir siempre con la altura del piso de las unidades de Cercanías que circulan por ellas. Sin embargo, se encuentra que esto no sucede así, como en el ejemplo del CIVIA de Alstom en las redes de Cercanías de la RFIG⁵.

En la Figura 21 se puede observar cómo varían las alturas de plataforma en Europa. En el siguiente punto se tratarán los mecanismos existentes para salvaguardar las diferencias entre altura de piso y altura de plataformas.

Por otra parte, la longitud de las composiciones viene determinada por la longitud de las plataformas. En las redes Cercanías de la RFIG la longitud de este último es de 200 metros.

Mecanismo para facilitar la accesibilidad

A continuación, se muestran los tres sistemas más utilizados en los trenes de Cercanías para salvar la diferencia de altura entre plataforma y piso del tren y poder garantizar de esta forma una cierta accesibilidad. Todos estos sistemas se caracterizan por ser elementos muy pocos fiables y se suelen condenar al poco tiempo de estar circulando por la cantidad de averías y problemas en la operación que generan.

A continuación, se exponen estos tres sistemas marcando en verde la altura de plataforma necesaria para operar con el mecanismo determinado.

En esta primera imagen (Figura 22) se puede observar el mecanismo que es, a su vez, el más sencillo y el que menos altura salvaguarda: el **estribo deslizante**.

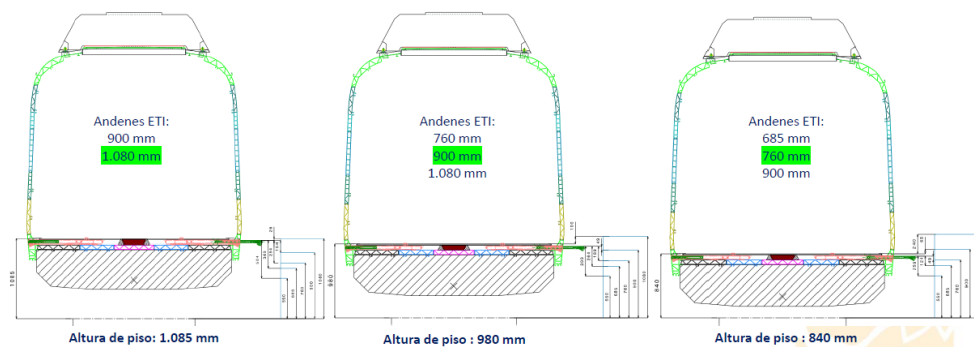


Figura 22. Altura de plataforma en la que se puede operar con estribo deslizante.

En esta segunda imagen (Figura 23) se puede observar el mecanismo más complejo, al estar formado por dos elementos, salvaguardando la misma distancia que el sistema anterior: el estribo deslizante y el escalón retraíble.

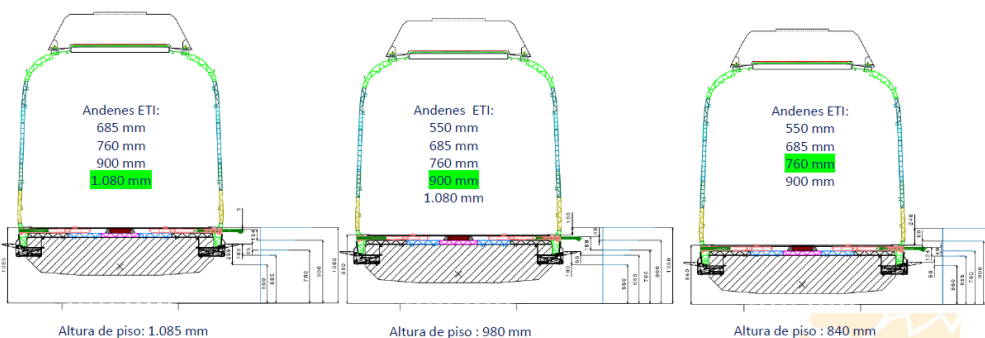


Figura 23. Altura de plataforma en la que se puede operar con estribo deslizante y escalón extraíble.

⁵ RFIG: Red ferroviaria de interés general

En la última imagen (Figura 24) se puede observar el mecanismo más endeble, pero a su vez con más capacidad. Este mecanismo es conocido como la rampa pivotante.

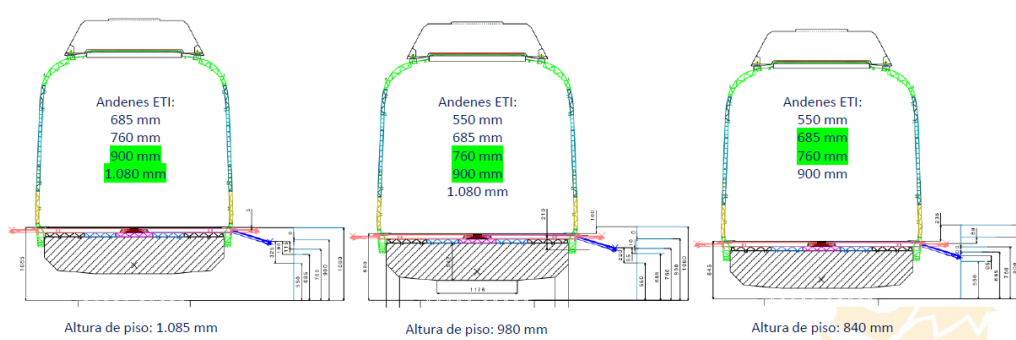


Figura 24. Altura de plataforma en la que se puede operar con rampa pivotante.

Carga por eje

La última condición que se va a analizar es la carga por eje. En el diseño de un Tren de Alta Velocidad se debe de garantizar que no tenga un sobrepeso tal que la infraestructura no lo soporte. Es decir, que no sobrepase la carga excepcional de tantas toneladas por eje (en caso de España 21,5 [t/eje]). Por el contrario, la tendencia en Cercanías es a maximizar la carga por eje, es decir, encaminar el diseño hacia todo lo que pueda dar la vía para reducir al máximo posible el número de bogies y maximizar la capacidad de pasajeros.

2.2.2.2 Arquitectura

Una vez se han analizado las limitaciones externas que condicionan las dimensiones y prestaciones del tren, se procede a profundizar el conjunto de rasgos generales que caracterizan la arquitectura de este. Estas características son fruto de la interrelación de la infraestructura y material rodante dentro del sistema del Cercanías.

En el análisis de cada característica estudiada se realiza una comparación entre las distintas soluciones con la finalidad de establecer un criterio con el que poder diferenciar cuál de estas es la más apropiada. El nivel de adecuación de una solución dependerá de la máxima fiabilidad, eficiencia energética, accesibilidad y capacidad que logre.

Las características que se analizarán son: el número de pisos, la distribución de la tracción, la arquitectura de los bogies y la localización de los equipos.

Número de pisos

Se encuentran dos tipos de configuraciones: coches de 1 piso y coches de 2 pisos. Estos pueden dar lugar a composiciones de solo 1 piso, de 2 pisos o mixtas intercalando coches de 1 piso y de 2 pisos.



Figura 25. Trenes de 1 piso, 2 pisos y mixtos [6].

Se ha visto hasta ahora como la capacidad de transporte, es la piedra angular dentro del segmento “Mass Transit”. El diseño de los Cercanías está en continuo cambio con la intención de ganar el máximo espacio posible para el transporte masivo de viajeros.

Cuando la línea está saturada, el sistema de señalización no permite introducir más trenes en la malla y la longitud de los andenes no permite aumentar el número de coches, una solución a la que se puede recurrir para incrementar la capacidad del transporte es a la compra de trenes de 2 pisos.

Los Cercanías de 2 pisos aprovechan al máximo el gálibo, duplicando la superficie aprovechable para pasajeros y aumentando así el número de asientos disponibles. De esta manera, se mejora mucho la tasa de confort (nº de asientos / pasajeros totales) y se reduce el coste por asiento.

Sin embargo, no todo es ideal con este tipo de configuración. El tiempo de embarque y desembarque se ve aumentado por la dificultad de movilidad del pasajero por la composición. Las escaleras y el espacio reducido en el piso superior complican el paso, sobre todo a personas con movilidad reducida: personas mayores o con maletas, carritos, bicicletas... De esta manera, los trenes de 2 pisos suelen aumentar el tiempo de recorrido de cualquier línea.

Otro problema de los trenes de 2 pisos es el poco espacio que queda para los equipos técnicos debido a este aprovechamiento máximo del gálibo. En este sentido, se pueden encontrar diferentes soluciones de colocación de los equipos en la composición:

- ALSTOM – (RENFE series 450 y 451): son composiciones “Push-Pull” y llevan los equipos en los coches motores extremos (50 plazas más la tracción; no confundir con el coche remolque con cabina).
- ALSTOM – MI 09: son composiciones autopropulsadas que sitúan los equipos técnicos en los vestíbulos de los coches intermedios a lo largo de todo el tren. De esta manera, se aprovecha la superficie lateral total para la subida y bajada de viajeros.

Los trenes de Cercanías de 1 piso no aprovechan al máximo las dimensiones del gálibo, pero, el tránsito es mucho más cómodo por toda la unidad. Esto se traduce en menores tiempos de embarque y desembarque al desaparecer los cuellos de botellas formados por las escaleras.

Distribución de la tracción

A continuación, en la Tabla 9 se muestran las diferencias entre las tracciones concentradas y distribuidas, atendiendo al operador y al usuario.

Tabla 9. Tracción Concentrada vs Tracción Distribuida.

		CONCENTRADA	DISTRIBUIDA
			
OPERADOR	Operación, Eficiencia Energética		
		Durante el trayecto, esta solución es menos efectiva al acelerar y frenar debido a que la mayoría de los vehículos son remolcados y el peso por eje es menor. De esta manera, se maximizan las faltas de adherencia y la transmisión del esfuerzo tractor o de frenado es descompensado. En consecuencia, en este caso el consumo de energía es mayor. En rotaciones en cabecera y talleres, se opera con más dificultades. Se suelen necesitar 2 maquinistas.	Durante el trayecto, el esfuerzo tractor por eje necesario es menor ya que la tracción es homogénea en toda la longitud del tren y el peso por eje mayor, minimizando las faltas de adherencia. Por consiguiente, la aceleración y frenado se consiguen acercar mejor a los valores óptimos. Y, por tanto, las pérdidas energéticas son menores. En rotaciones en cabecera y maniobras de talleres, este tipo de soluciones aportan mucha más flexibilidad.
	Inversión, Coste, Disponibilidad		
		La inversión inicial para adquirir una unidad es baja. La fiabilidad del equipo de potencia es mayor, al encontrarse toda ella concentrada. Resulta más sencillo la redundancia y como resultado el número de equipos es mucho menor. A su vez, el coste de mantenimiento es reducido al tener un menor número de motores que conservar. El coste solo se elevaría en caso de que el operador tenga que pagar el canon por daño a la infraestructura. La mayoría de la carga concentrada se encuentra en los vehículos motrices provocando bastante desgaste y rotura de carril.	La inversión inicial para adquirir una unidad es baja. La fiabilidad de los equipos de potencia es más difícil de conseguir ya que son más complejos y están más repartidos. El resultado de tener que redundar todo es un mayor número de equipos. En este sentido, el coste de mantenimiento es mucho mayor. En caso de que el operador tenga que pagar el canon por daño a la infraestructura, en este tipo de unidades el desgaste es menor al estar repartida la carga homogéneamente a lo largo del tren.
USUARIO	Tiempo de trayecto, Accesibilidad		
		El espacio amplio y homogéneo que dejan los bogies remolques en el interior de la caja y la posibilidad que ofrecen de tener la altura del piso a ras del andén, son características que en principio contribuyen a reducir el tiempo de embarque y desembarque. Sin embargo, no se puede aprovechar la superficie lateral completa del tren por la longitud de andén que ocupa el vehículo motriz. En consecuencia, el número de puertas es menor. Los pasajeros tienen menos opciones para subir y bajar del tren, y esto hace que aumente los tiempos de parada durante el trayecto.	La elevada altura de piso y el espacio reducido y heterogéneo que proporcionan los bogies motores en el interior de las cajas dificultan el acceso desde el andén y el tránsito de personas por la composición. Sin embargo, se aprovecha al máximo la superficie lateral del tren al no tener vehículo motriz. Los pasajeros cuentan con un mayor número de puertas para acceder desde el andén. De esta manera, se favorece el tiempo de embarque y desembarque, reduciendo el tiempo global de recorrido en una línea.

Arquitectura de los bogies

Uno de los objetivos más importantes en el diseño de un bogie de Cercanías es conseguir una adecuada estabilidad dinámica en curva. Para ello, se deberá tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La suspensión primaria del bogie debe tender a una rigidez longitudinal reducida y una rigidez lateral elevada. La variación entre las rigidices no puede ser muy grande ya que acabaría afectando a la estabilidad dinámica en recta, con lo que puede suponer en un tipo de material rodante como este donde el confort de las aceleraciones y frenadas es muy importante.
- La conicidad de las ruedas se recomienda que sea elevada. Hay que tener en cuenta cuánto se reduce la velocidad crítica al aumentar este parámetro. Un valor bajo de velocidad crítica aumenta el riesgo de que el tren entre en un estado de perturbaciones dinámicas perjudiciales (ej.: movimiento de lazo).
- También, los bogies de los trenes de Cercanías son característicos por tener menos empuje e inercia que los bogies de alta velocidad.

En este sentido, se suelen encontrar dos tipos de arquitecturas en los trenes de Cercanías que van a ser analizadas a continuación en la Tabla 10: la arquitectura de bogies de caja convencional y la arquitectura de bogies de caja articulada.



Figura 26. Arquitectura de bogies de caja convencional del UT-592 [8].



Figura 27. Arquitectura de bogies de caja articulada del CIVIA [8].

También, se encuentra un tipo excepcional de arquitectura de caja que favorece la inscripción en curva; “**la caja suspendida**”. Se ha querido incluir en este análisis, aunque se utilice en material rodante del tipo tranviario.



Figura 28. Arquitectura de caja suspendida del tranvía de Bombardier (Flexity Freedom) [12].

Este tipo de solución no tiene bogies y aprovecha el espacio completo de la caja. Cuenta con mucha amplitud en el paso entre coches y una gran superficie lateral, lo cual se traduce en un número de puertas elevado. De esta manera, se favorece la movilidad de los pasajeros y se reduce el tiempo de embarque y desembarque.

Por último, cabe destacar que el coste de mantenimiento es reducido al tener menos bogies y que la carga total de la composición es baja. Sin embargo, el peso por eje es muy elevado y se necesitan las líneas que cuenten con clotoideas por problemas del gálibo en curva.

Tabla 10. Arquitectura de bogies convencional vs Arquitectura de bogies articulada.

		CONVENCIONAL	ARTICULADA
		Al tener dos bogies por caja, tiene un mayor nº de bogies por composición. Al ser más ejes los que soportan la carga total de los coches, el peso de la caja no está tan limitado. Por consiguiente, se permiten longitudes de caja mayores. Al no tener que soportar tanta carga, el tamaño es menor (menor distancia entre ejes).	Al tener un bogie en el acoplamiento entre dos cajas, el número de bogies resultante en la composición es menor. Al ser menos ejes los que soportan la carga total de los coches, el peso de la caja está limitado. En consecuencia, las cajas no pueden tener mucha longitud. Al tener que soportar más carga, el tamaño de bogie es mayor (menor distancia entre ejes).
OPERADOR	Operación, Eficiencia Energética		
	<p>Con un mayor número de bogies se puede conseguir unos consumos energéticos menores al reducirse el esfuerzo tractor por eje necesario. También, se puede esperar que la aceleración y frenada estén más cerca de los valores óptimos.</p> <p>Por otro lado, gracias a las tecnologías existentes en la unión caja-bogie (rotulas) y a que el empuje es pequeño, se puede inscribir mejor en radio de curva pequeños.</p>		<p>Con menos bogies puede darse que la necesidad de esfuerzo en cada eje tenga que ser mayor. Y, por tanto, la demanda de energía también sea mayor.</p> <p>Por otro lado, tienen una limitación de inscripción a partir de ciertos radios de curva. Aparecen esfuerzos no deseados en la unión cajas-bogie. Por eso, en redes metropolitanas donde se padecen radios de curva muy pequeños no se encuentran generalmente trenes articulados. Aunque cabe destacar que no todo es malo, la articulación favorece la circulación por estos tramos al proporcionar un ángulo de ataque reducido.</p>
OPERADOR	Inversión, Coste, Disponibilidad		
	<p>La inversión inicial para adquirir una unidad suele ser menor por la facilidad del transporte de origen a destino de este tipo de coches. No es necesario desmontar el bogie de la caja.</p> <p>También, en caso de que el operador tenga que pagar el canon por daño a la infraestructura, en este tipo de unidades la retribución sería menor por el reducido desgaste de los bogies (el peso se reparte entre un mayor número de bogies).</p> <p>Sin embargo, el coste de mantenimiento es mayor al tener mayor número de bogies. Y, en caso de descarrilo el acoplamiento entre coches es más débil y la rotura de la composición es casi inminente.</p>		<p>La inversión inicial para adquirir una unidad es mayor sobre todo por lo caro que sale el transporte. Se debe de desmontar y montar los bogies de las cajas tanto en origen como en destino provocando un nº de maniobras muy elevado. También, en caso de que el canon fuese por daño a la infraestructura, el operador debería desembolsar más dinero porque los ejes de los bogies de este tipo de unidades desgastan más al soportar más carga (el peso se reparte entre un menor número de bogies).</p> <p>Sin embargo, el coste de mantenimiento sale mejor ya que tiene un número de bogies menor que conservar. Y, además, se podría destacar que en caso de descarrilo, al ser el bogie el elemento de unión entre cajas, el tren resiste más la rotura de la descomposición.</p>
USUARIO	Confort		
	<p>El bogie suele situarse debajo de los asientos de los pasajeros, por lo que la vibración y el ruido le llega directamente.</p>		El ruido que llega al pasajero es menor al estar el bogie en la zona de intercirculación.
USUARIO	Tiempo de trayecto		
	<p>Al tener un empuje menor y una longitud de caja mayor, queda más espacio disponible bajo bastidor para instalación de equipos dejando libre de armarios técnicos el interior de los coches reservado para pasajeros. Además, el paso de intercirculación entre coches es amplio lo que permite una buena distribución de pasajeros a lo largo de la composición. Ambas características ayudan a reducir el tiempo de parada y por tanto del trayecto completo. Sin embargo, una caja de gran longitud tiene limitado el ancho por el galibo dinámico. Por lo que el espacio interior para el pasajero es algo menor.</p>		<p>Al contar con un mayor empuje y una longitud de caja menor, el espacio bajo bastidor para instalación de equipos se ve reducido. Aparece la necesidad de colocar los componentes en armarios técnicos perjudicando la superficie reservada para el pasajero. Además, el paso de intercirculación es más estrecho al encontrarse el bogie.</p> <p>Sin embargo, las cajas son más anchas ya que la longitud de este tipo de coches articulados es más corta. En este sentido, el espacio para el pasajero es algo mayor.</p>

Localización de equipos

La localización de los distintos equipos del tren suele ser la siguiente: en la parte superior del techo suelen ir siempre el equipo de captación eléctrica (pantógrafo y protecciones), el equipo de climatización ya que tiene que absorber aire fresco y limpio y el reóstato de freno. El resto de los equipos y componentes técnicos se distribuyen entre el techo y el suelo según el diseño del espacio que quede disponible.

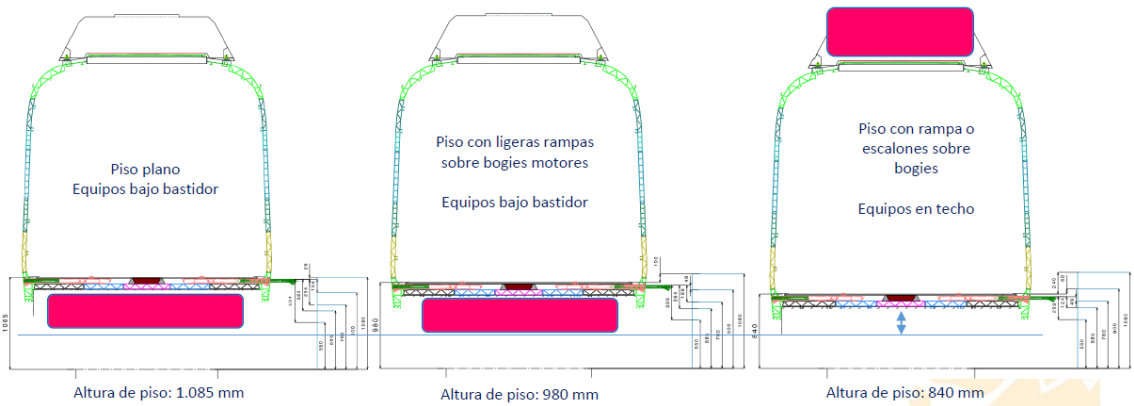


Figura 29. Localización de equipos [3].

Debido a la altura de los bogies motores no existen trenes de Cercanías que lleven los equipos en el techo y la altura de piso sea integral en toda la composición. Es un reto para los trenes de piso bajo homogeneizar la altura de piso a lo largo del todo tren, manteniéndolo a la misma altura del andén.

Tabla 11. Equipos bajo bastidor vs Equipos en techo.

	Equipos bajo bastidor	Equipos en techo
OPERADOR	Operación, Eficiencia Energética	
	Dinámicamente es mejor ya que baja el centro de gravedad.	Desde el punto de vista dinámico es peor y se tienen mayores coeficientes de <i>souplesse</i> .
	Inversión, Coste, Disponibilidad	
	En temas de mantenibilidad es mejor solución porque ofrece un acceso sencillo a los equipos desde foso a media altura.	En este caso el mantenimiento es más complejo ya que hay que acceder al techo. Se necesitan talleres de tres niveles. Conlleva problemas de seguridad al tener que trabajar en altura y cerca de la catenaria.
USUARIO	Tiempo de trayecto, Accesibilidad	
	Desde el punto de vista de la accesibilidad y del tiempo de embarque y desembarque está solución es la peor que se puede tener.	Gracias al piso bajo, la accesibilidad es la deseada y el tiempo de embarque y desembarque puede jugar en los valores que se buscan.

Como se puede observar en la Tabla 11, los equipos bajo bastidor es el tipo de solución más conveniente para un operador, mientras que equipos en techo es la más adecuada para el usuario. Más adelante, se podrá observar el proceso de cambio de mentalidad de los fabricantes dentro del mercado respecto a esta característica. Cómo sus primeros productos tendían a ser diseñados con los equipos bajo bastidor, y cómo los últimos trenes que se están viendo tienen los equipos en techo. El mercado ha evolucionado con el objetivo de poner al usuario como centro de la operación.

2.2.2.3 Distribución Interior

Una vez analizados las limitaciones externas que condicionan las dimensiones y prestaciones del tren, y el conjunto de rasgos generales que caracterizan la arquitectura de este, se procede a estudiar la última parte del sistema del Cercanías, fruto de la interrelación con la arquitectura recién analizada: la distribución interior.

Al igual que el apartado anterior en cada elemento analizado se realiza una comparación entre las distintas soluciones con la finalidad de establecer un criterio con el que poder diferenciar cuál de estas es la más apropiada. El nivel de adecuación de una solución dependerá de la máxima fiabilidad, eficiencia energética, accesibilidad y capacidad que logre.

Los elementos que se analizarán son: asientos, mesas, puertas, asideros, mamparas, portaequipajes, espacios diáfanos y para bicicletas, baños y transición de niveles.

En todos estos, las superficies deben ser suaves para evitar cualquier raja o enganchón del pasajero. Sin embargo, la necesidad de cada elemento es distinta según el tipo de coche. Se encuentran los siguientes tipos:

- Coche extremo, ubicación de la cabina del maquinista
- Coche intermedio
- Coche intermedio con baño
- Coche con zona PMR
- Coche con zona para bicicletas

Por último, cabe destacar que todos estos elementos deben de intentar evitar el vandalismo que se lleva aproximadamente el 30% del coste del mantenimiento. Posibles soluciones son la pintura anti-graffiti, laminado de ventanas, recubrimiento de asientos, asientos fáciles de restituir y limpiar o un diseño interior básico (no espacio como papelería), entre otras.

Elementos

A continuación, se van a analizar los diferentes elementos que conforman el interiorismo de un coche de Cercanías. El mayor o menor número de ellos estará relacionado con la movilidad que se quiera tener dentro de la composición. Esto a su vez tiene conexión con el tiempo de embarque y desembarque. Salvo en el caso de las puertas, en el resto de los componentes a mayor número mayor dificultad de movilidad y mayor tiempo de embarque y desembarque.

Asientos

Es uno de los elementos principales ya que el tren de Cercanías es el sistema ferroviario que ofrece mayor tasa de confort, es decir, en comparación con el metro y el tranvía la relación de pasajeros sentados frente a los totales es mayor. Los asientos suelen ser antilevel para facilitar la limpieza, una de las operaciones de mantenimiento más costosa.

Existen tres posibles configuraciones de asientos en un tren de Cercanías: VIS a VIS, Flight mode y Transversales. Estas tres posibilidades de disponer los asientos son complementarias y pueden aparecer simultáneamente distribuidas en una misma unidad, o incluso entremezcladas en una misma caja.

A continuación, en la Figura 30, se muestra una solución que apuesta por mantener el mismo tipo de configuración de asientos en cada coche. Este es el caso del ya mencionado tren de CAF de Auckland. En los coches extremos de piso alto (por llevar los bogies motores) se disponen en modo avión, y en el coche intermedio remolcado cabe destacar que es de piso bajo para facilitar el acceso de personas de movilidad reducida y usuarios en sillas de ruedas.

En contraposición, se presenta en la Figura 31 donde se puede observar una disposición de asientos mixta: VIS a VIS y transversal. En este caso, la altura de piso de la composición es homogénea.

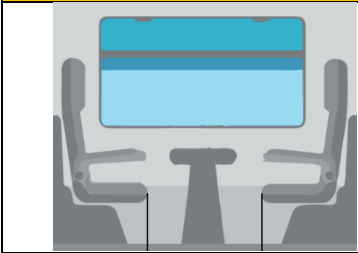
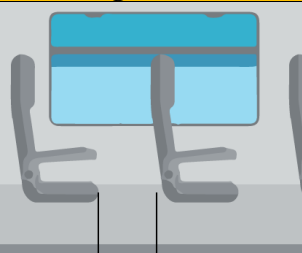
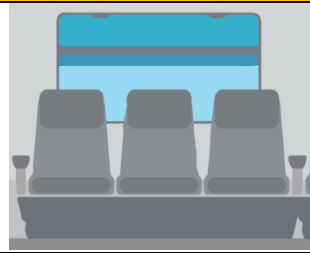


Figura 30. Distribución interior de asientos del Tren de Cercanías de CAF (Auckland, Nueva Zelanda) [10].



Figura 31. Distribución interior de asientos de la UT 446 de RENFE.

Tabla 12. Comparación de tres diferentes configuraciones de asientos.

VIS a VIS		Flight mode	Transversales
			
Nº de personas sentadas / coche			
Las filas de asientos suelen estar separadas unos 100 [mm] más que en la configuración “flight mode”. Esto supone que a nivel de la caja haya un total de menos asientos.		El espacio entre filas de asientos es el mínimo de los tres casos. Por fila puede haber 2, incluso 3 asientos. Es la solución que más personas sentadas es capaz de introducir en un coche.	La distancia entre filas de asientos es el ancho del pasillo. Desaprovecha todo ese espacio para asientos, en ganancia de espacio para más pasajeros de pie.
Capacidad de transporte = Nº de personas totales			
Es la más apropiada para conseguir un compromiso equilibrado entre personas sentadas y de pie. Es decir, una buena tasa de confort, y una capacidad de Tte. elevada.		Es la solución que menos espacio deja para que vayan personas de pie. Muy mala aplicación en líneas con necesidad de altas capacidades.	Al poder ir más personas de pie, caben un mayor número. Es la solución utilizada por excelencia en los metros de los grandes centros urbanos.
Inversión, Coste			
El espacio de la ventana suele coincidir con el ancho de los asientos en posición tertulia. De esta manera, se consigue una distribución simétrica de los asientos en la caja. Por consiguiente, los costes de fabricación se reducen mucho por modularidad.		En la distribución de los asientos existe una asimetría inevitable debido a que la fila pegada al extremo del coche no puede ir mirando la pared. En consecuencia, siempre se han de enfrentar dos filas en un extremo. La configuración de ventanas se descoloca y aumentan los costes de fabricación.	El ancho del asiento y la separación entre asientos se debe de diseñar desde un punto de vista ergonómico. Sin embargo, no hay que olvidarse de la importancia de aprovechar bien el espacio disponible. Cuando son abatibles el coste de mantenimiento también se ve agravado.
CLIENTE	Confort	Confort ante aceleraciones y frenadas	
		50% de los pasajeros viajan en sentido contrario a la marcha.	Muy poca comodidad.
		Intimidad⁶	
		Fácil de contactar con los pies y las rodillas del de delante.	Contacto fácil con otros pasajeros por ser transversales a la marcha.
		Espacio para los pies	
		Peor caso.	Solución con más espacio.
		Visibilidad	
		Es la solución que tiene mejor visibilidad por la ventana.	Muy poca si tienen pasajeros que tapan la ventana de enfrente.
		Tiempo de recorrido, Accesibilidad	
		El pasajero que va en el lado de la ventana puede desembarcar sin molestar mucho al pasajero de pasillo.	Es la mejor solución gracias al ancho de paso que deja para el tránsito de personas con movilidad reducida a lo largo de la composición.

⁶ La intimidad es un factor muy importante cuando se recorren grandes distancias.

Puertas

Es el otro elemento principal dentro de la distribución interior de las cajas de un tren. En la mayor parte de unidades del mercado, se encuentran dos puertas por costado. Sin embargo, también se pueden hallar algunas soluciones con coches de tres puertas.

El número de puertas tiene una relación estrecha con los asientos. A mayor número de puertas, menor número de asientos se pueden disponer en un coche. Ejemplo de ello es la diferencia entre un coche de un metro y un coche de un Cercanías. El primero suele tener de tres a cuatro puertas, mientras que el segundo tan solo dos, como se ha mencionado.

En la Tabla 13 se muestra cómo, según el tipo de mecanismo de las puertas, se puede disponer de un tipo de fijación de asiento a la pared o al suelo, siendo el primer caso el más conveniente.

Tabla 13. Tipo de fijación de asientos según mecanismo de puertas.

Tipo de fijación de los asientos	Mecanismo de las puertas	Ventaja	Desventaja
A la pared	Deslizantes	Facilidad de montaje y limpieza.	Cuando están abatidas/abiertas corren el peligro de desequilibrarse por el apoyo/carga de personas.
Al suelo	Embutidas	Protección de las puertas.	Al condicionar la fijación de asientos a la pared, aumenta la dificultad en el montaje y limpieza.

Mesas

Las mesas son un elemento interesante para analizar dentro de un tren de Cercanías, ya que apenas se encuentran soluciones en el mercado. Tampoco se tiene experiencia sobre si este componente puede llegar a integrarse en la usabilidad del tren. La razón principal por la que no aparece es que se convierten en un impedimento a la hora de entrar y salir de los asientos. Es por ello que se suele evitar la inclusión de estas en los diseños del interior del tren, ya que pueden suponer un aumento del tiempo de embarque y desembarque, como se mencionaba anteriormente.

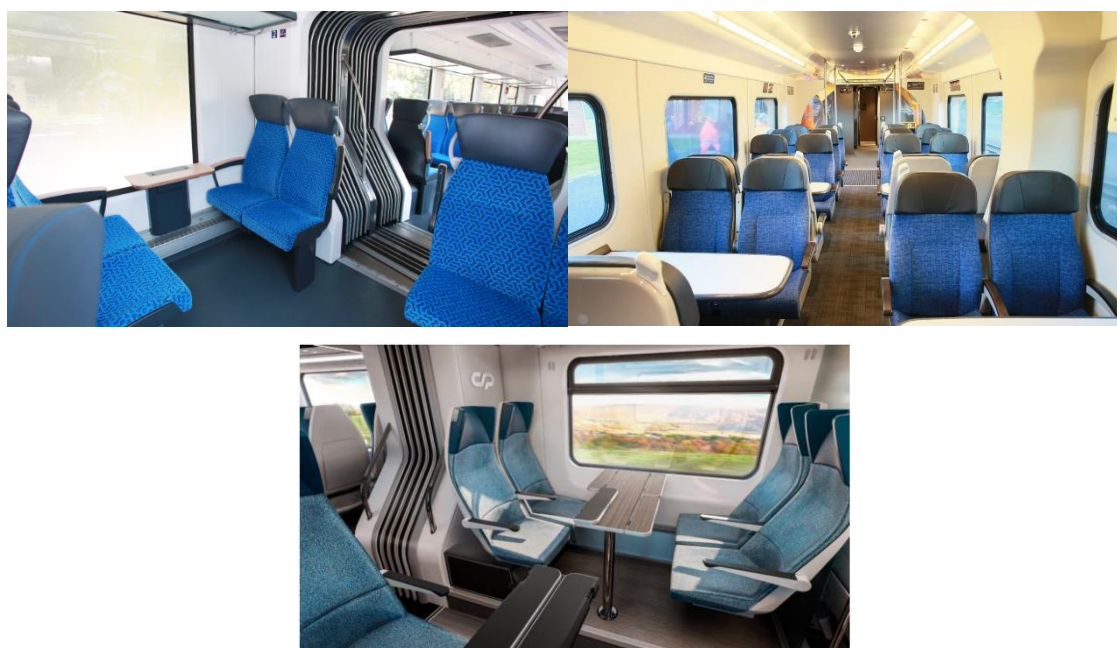


Figura 32. Ejemplos de mesas en trenes.

Asideros

Este elemento aparece poco en el interiorismo de un coche de Cercanías en comparación con un metro. La necesidad de agarrarse al asidero se presenta en el usuario cuando los trenes circulan con altos picos de densidad de pasajeros.

Estos asideros suelen ir integrados en la cabecera de los asientos o en los techos, aunque también se pueden ver soluciones de asideros en forma de barras tubulares que abarcan la altura completa de la caja. Este último tipo puede resultar de interés para su análisis y aplicación a la propuesta final de este proyecto.

Cabe destacar que, en caso de contar con asientos transversales, se han encontrado pocos ejemplos que utilicen separadores para evitar el contacto físico cuando se sufren aceleraciones y frenadas.



Figura 33. Ejemplos de asideros.

Mamparas

Es un elemento poco frecuente en las soluciones de trenes de Cercanías que operan en los grandes núcleos europeos, ya que perjudica en gran medida el tiempo de embarque y desembarque. Cabe destacar que es una propiedad heredada de los Trenes Regionales.

La funcionalidad de este componente es la de protección del pasajero contra el frío, especialmente en la apertura de puertas. Existen infinidad de diseños, todos ellos pensados con la finalidad de cortar el viento.



Figura 34. Ejemplos de Mamparas.

Portaequipajes

Los portaequipajes es un elemento con el que históricamente se han diseñado los coches, aunque actualmente la tendencia es a su desaparición. Estos siempre se han incluido debido a la necesidad de que el usuario pueda dejar cómodamente sus bártulos.

Sin embargo, presenta varios inconvenientes que se exponen a continuación. El primer motivo sería debido a la seguridad. Existe una alta sensibilidad del pasajero como consecuencia de los atentados terroristas, por lo que el olvido de una mochila en uno de estos compartimentos puede causar grandes problemas de explotación por la parada de trenes. En caso de ir el tren excesivamente lleno, surge el inconveniente de que estos portaequipajes facilitan el robo de pertenencias.

Actualmente, solo quedan algunos pliegos donde se sigue pidiendo este tipo de mobiliario y se especifica un diseño de carácter visible y llamativo, para no dar pie a todos estos problemas.

Espacios

Ya analizados los diferentes elementos que se pueden distribuir en el interior de un coche, queda por comentar la disposición de los diferentes espacios. En todos los transportes de masas es importante analizar en profundidad estas zonas de los coches.

Se pueden encontrar los vestíbulos situados al lado de las puertas y destinados a facilitar la subida y bajada de pasajeros. A parte de estos espacios libres de elementos, se encuentran en todas las composiciones espacios diáfanos destinados a proporcionar accesibilidad a las personas de movilidad reducida (sillas de ruedas y carritos), y también con funciones específicas como albergar bicicletas.

La Comisión de Transportes y Turismo del Parlamento Europeo ha proyectado que para dentro de dos años entre vigor un reglamento en el cual todos los trenes de cualquier tipo, que circulen por Europa, estén obligados a asignar un espacio reservado exclusivamente para bicicletas. Se está meditando sobre la provisión de ocho espacios.



Figura 35. Espacio diáfano del coche intermedio del tren Coradia iLint de Alstom.

Baño

De los diferentes medios de transporte ferroviarios del segmento Mass Transit, el Cercanías es el único que tiene la obligación de disponer de baños. Según la ETI PMR y la UIC 565-3 el baño debe ser accesible para PMR. Es por eso por lo que se deben encontrar en un coche de piso bajo con acceso a la altura del andén. Las dimensiones de este también se han visto modificadas con la aplicación de esta norma, al estar diseñados para ser accesibles para personas con movilidad reducida. La utilización de los baños es muy reducida y normalmente es un lugar donde predomina el vandalismo sobre el uso para el que fue diseñado.

Transición entre niveles

Cuando un tren de Cercanías tiene una altura de piso igual o menor a 980 mm y los equipos en el techo, o bien cuando tiene todos los equipos localizados en el techo, como se comentaba en el apartado 0, se necesitan rampas y escalones para salvaguardar la altura de los bogies.

Esta transición de niveles entre pisos del mismo coche se puede llevar a cabo mediante escalón o rampa. La cuestión está en cuándo utilizar un tipo u otro de estas dos soluciones.

Por un lado, la rampa favorece mucho la accesibilidad, el tránsito a través de toda la composición. Sin embargo, desconfigura mucho la distribución de asientos, y, además, también pierde superficie donde puedan ir cómodamente pasajeros de pie esperando llegar a su destino.

Por otro lado, el escalón o peldaño pequeño tiene a su favor la ganancia de superficie de piso plano para asientos y demás necesidades. Sin embargo, impide una accesibilidad total a la unidad. Aunque la necesidad de un tránsito cómodo a lo largo de todo el andén es discutible.

En RENFE, por ejemplo, la política que ha tenido siempre en sus trenes de Cercanías ha sido intentar tener la misma altura de piso a lo largo de toda la composición salvaguardando la altura de los bogies a base de condenar el acceso desde el andén. Todas las compras de trenes hasta ahora han tenido los equipos bajo bastidor. Lo cual se ha visto que no tiene sentido cuando la altura de los andenes de las estaciones de Cercanías de una de las dos redes más grandes (Madrid) es reducida, encontrándose entre 760- 840 mm.

2.2.3 Estudio del mercado

Una vez analizado por qué el tren de Cercanías es un sistema principal para la estrategia de movilidad de una ciudad y las características y límites con las que cuenta para responder a este reto, se procede a estudiar en este apartado las tendencias de los fabricantes y las diferentes soluciones del segmento “Mass Transit”.

Este mercado históricamente se caracteriza por las exigencias de coste, plazo y fiabilidad de los productos. Sin embargo, en relación con lo comentado en el apartado anterior, la alta capacidad y accesibilidad son, a su vez, exigencias a considerar.

2.2.4.1 Tendencias

La creciente necesidad de las ciudades de un transporte de masas que une el centro con las periferias hace que la tendencia del mercado de Cercanías sea al alza.

En la Tabla 14 se encuentran zonas con tendencia creciente y zonas con tendencia decreciente, ya que la evolución de este mercado no es homogénea en todas las regiones del mundo.

Segmentación del mercado

A continuación, se muestran estudios de distintas zonas del mundo con valores comparables entre sí con el fin de agrupar por tendencias y exigencias principales estas zonas.

Tabla 14. Crecimiento del tamaño total del mercado de cada parte del mundo (en billones de euros, media anual de los últimos tres años) [5].

Región	Tamaño total [Billones €]		Tendencia	Exigencias principales	Precio del Mercado [Millones €]
	2019	2022			
Oeste Europa	6,4	7,2	↑ (+4%)	- Capacidad media - Menor gasto de Energía posible - Referencia necesaria - Accesibilidad, Información al pas.	5,0
MENA	0,2	0,9	↑ (+61%)		5,0
NAFTA	0,4	0,5	↑ (+9%)		5,0
APAC	3,7	3,9	~ (0%)	- Capacidad alta - Precio es el principal “driver” - Invierno*	4,3 (5,0 AUS)
África	0,1	0,4	↑ (+61%)		4,3
Este Europa	0,8	0,6	↓ (-8%)		5,2
CIS*	0,2	0,4	↑ (+19%)		5,2
América Latina	0,4	0,4	~ (0%)		4,8
TOTAL	12,2	14,3			

El crecimiento mayoritario del mercado del Cercanías en Europa ha venido impulsado por la evolución y consolidación de la clase media. Se espera que este fenómeno sociológico siga extendiéndose en el resto del mundo.

Como mercados interesantes destacan toda la Europa Occidental y, dentro de la zona de Oceanía y Asia Oriental, Australia, Japón y Corea.

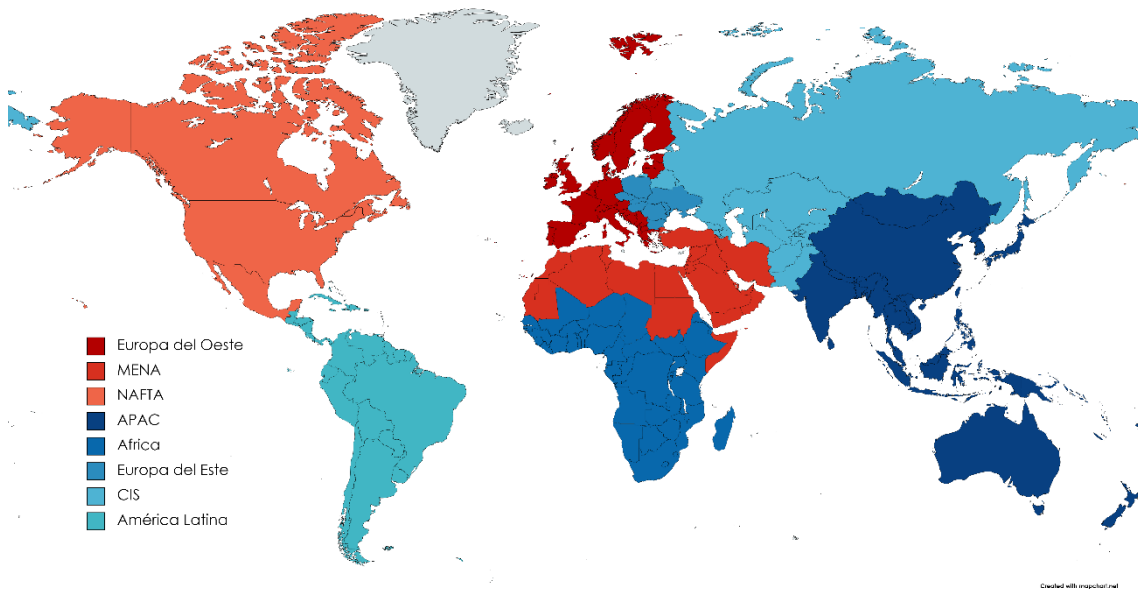


Figura 36. Distribución del mundo por regiones.

Drivers

Los factores que más influyen en la decisión de la compra de un Cercanías son el precio y las referencias previas de la empresa. Aunque estos dos “drivers” sean los más importantes, se puede observar en la Figura 37 cómo la propuesta técnica (rendimiento del producto) y la confianza en el cumplimiento de los plazos son también factores clave para los compradores.

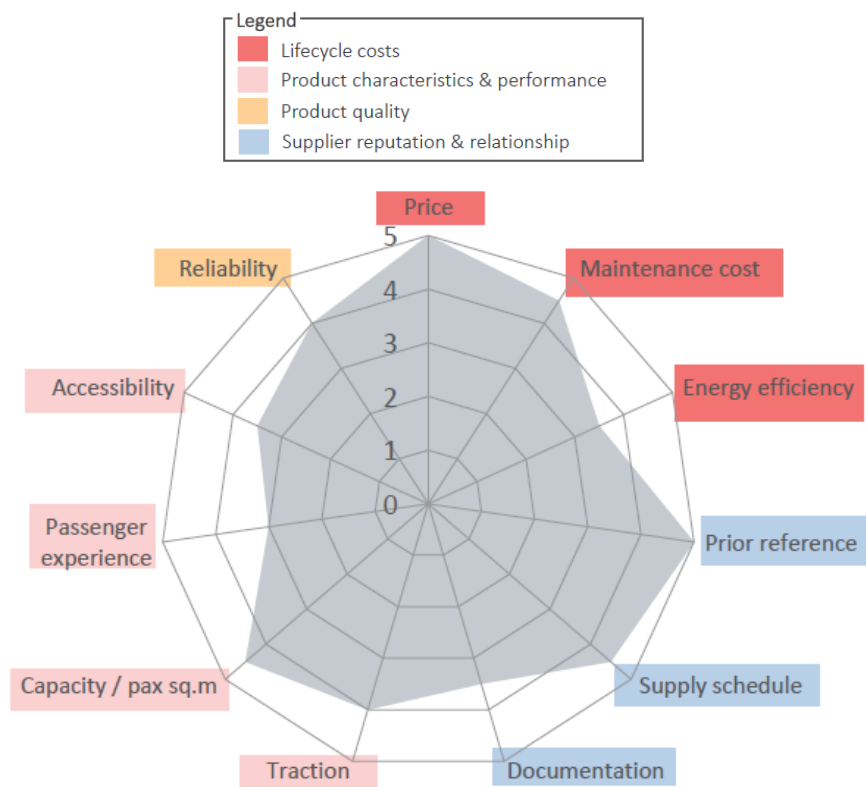


Figura 37. Comparación de los diferentes criterios de compra [5].

Distribución del Mercado

Mediante los siguientes tres gráficos se pretende dar una visión simplificada de las últimas tendencias del mercado de Cercanías:

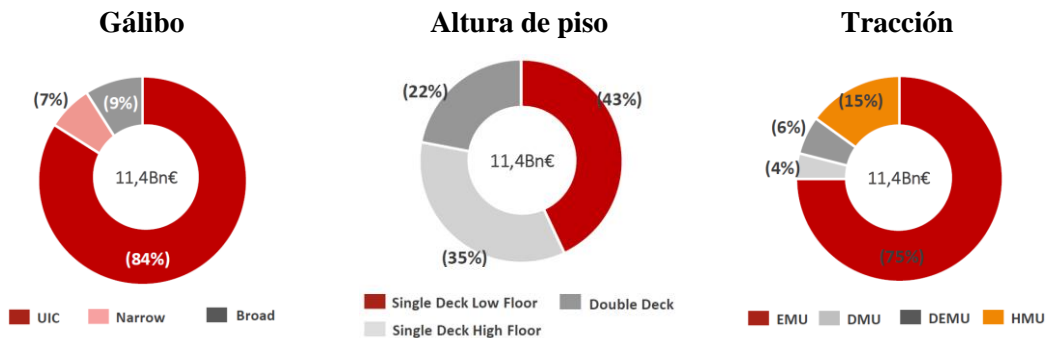


Figura 38. Distribución del mercado desde el punto de vista del gálibo, altura de piso y tracción [5].

De estos gráficos obtenemos las siguientes conclusiones:

- Desde el punto de vista del gálibo, el UIC es el tipo de gálibo que se está implementando en las redes interurbanas de nueva construcción.
- En cuanto a la altura de piso, un solo nivel y altura de piso baja es el tipo de plataforma más presente en el mercado.
- Por último, en cuanto al tipo de tracción, los operadores de redes ferroviarias no electrificadas están demandando alternativas a los trenes diésel.

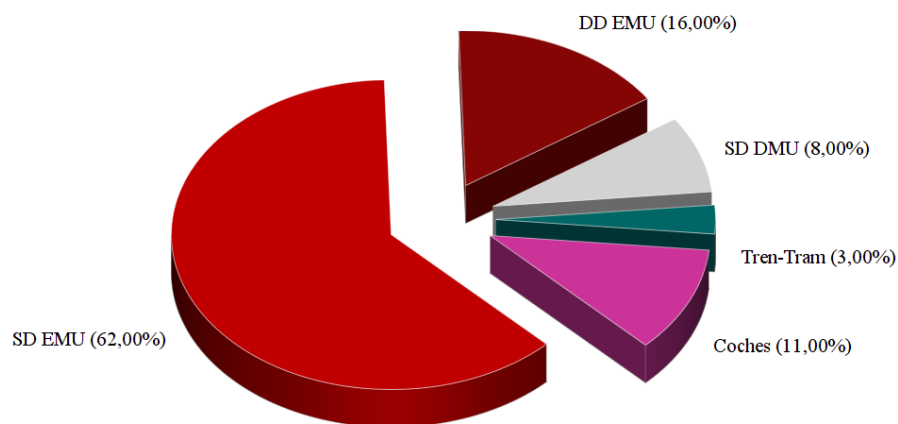


Figura 39. Distribución del mercado según el tipo de unidad (altura de piso y tracción) [5].

En el gráfico de la Figura 39, se puede observar las diferentes tendencias según el tipo de unidad:

- La tendencia en los DMUs es claramente decreciente por diferentes razones, pero la más importante es la contaminación acústica y en destino.
- La tendencia de los EMUs de 1 piso es claramente creciente, y la de los 2 pisos ha aumentado solo ligeramente. En esta línea, una de las razones del crecimiento es la poca contaminación en destino, aunque la producción de energía eléctrica sí que lo sea. Finalmente, es lo que afecta directamente al ciudadano lo que manda en el mercado.
- Las composiciones de coches tipo Push Pull tienden a la desaparición dentro de este mercado de Mass Transit. La dificultad que tienen para acondicionarse a las grandes capacidades, no les deja explotar sus ventajas en modulación y adaptación a la fluctuación de la demanda diaria.

2.2.4.2 Fabricantes

Siguiendo la línea de investigación del segmento “Mass Transit” marcada, en este apartado se procede a estudiar el mercado desde el punto de vista de los fabricantes. Este se caracteriza por ser altamente competitivo, con la presencia de más de 30 empresas manufactureras.

En primer lugar, se analiza la relación existente entre los operadores y los fabricantes. Antes de nada, es importante destacar que el proceso de liberalización es difícil que acabe adentrando en este segmento por el nivel de subvenciones que hay. En la Figura 40 se puede observar el abanico de grados de competencia entre Empresas Ferroviarias OSP⁷.

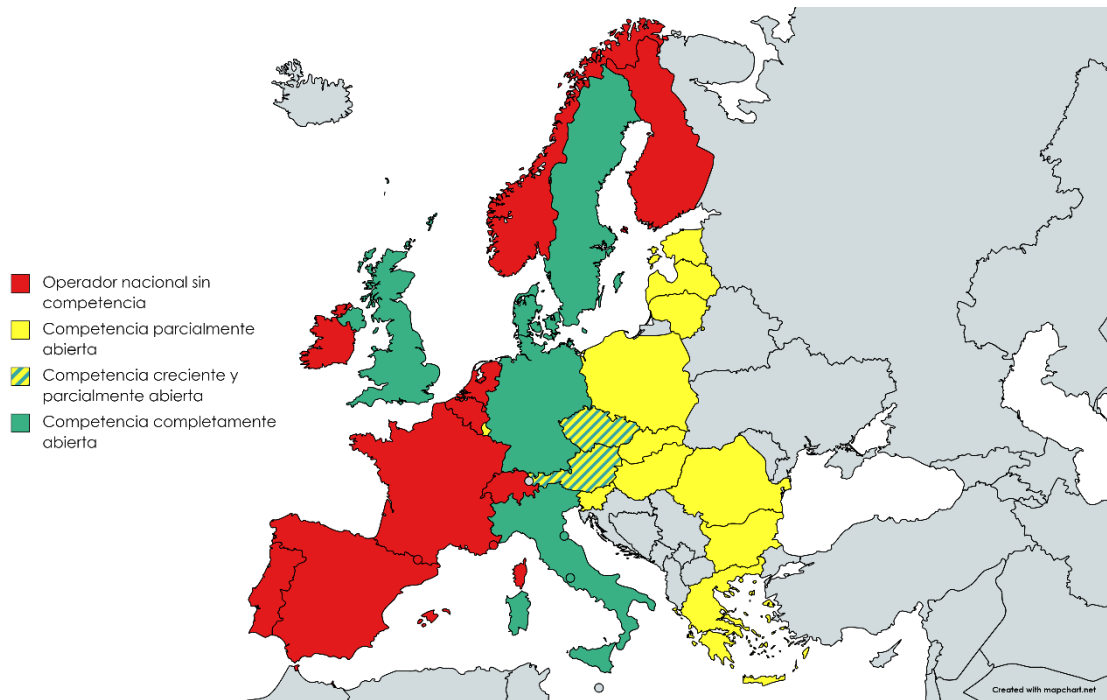


Figura 40. Liberalización de las OSP ferroviarias

Estos tres grados de liberalización se corresponden más con el mercado de Trenes de Alta Velocidad. Sin embargo, la competencia entre operadores acaba trasladándose a las redes convencionales. Como se ha comentado, al ser un segmento subvencionado, esta competencia no es real. Aun así, se pueden distinguir estas tres zonas en Europa.

De esto se puede concluir que las políticas nacionales en la industria del ferrocarril siguen teniendo más peso que los grandes contratos. En este sentido, se puede encontrar como los trenes de Cercanías de naciones como Francia son todos de Alstom o en Rusia todos son de TMH⁸, mientras que en otros países como Italia se puede encontrar trenes de Stadler, Alstom e Hitachi.

Cabe destacar que empresas como Stadler y CAF están rompiendo con estas barreras y se están haciendo paso en el mercado. Por ejemplo, Stadler predomina en Europa del Este (Hungría, Polonia, etc.) perjudicando a los fabricantes locales (OEM⁹) de esta zona del viejo continente.

También es interesante destacar que la mayoría de las estrategias de entrada en el mercado de los competidores se ha dirigido a mercados medianos y pequeños operadores, siguiendo estrategias de localización para crear capacidad de producción.

⁷ OSP: Organización con Obligación de Servicio Público.

⁸ TMH; Transmashholding; mayor fabricante de material rodante ruso.

⁹ OEM; Original Equipment Manufacturer

De esta forma, en la Figura 41 y en la Figura 42 se puede encontrar la siguiente distribución de fabricantes a nivel europeo y a nivel mundial, respectivamente:

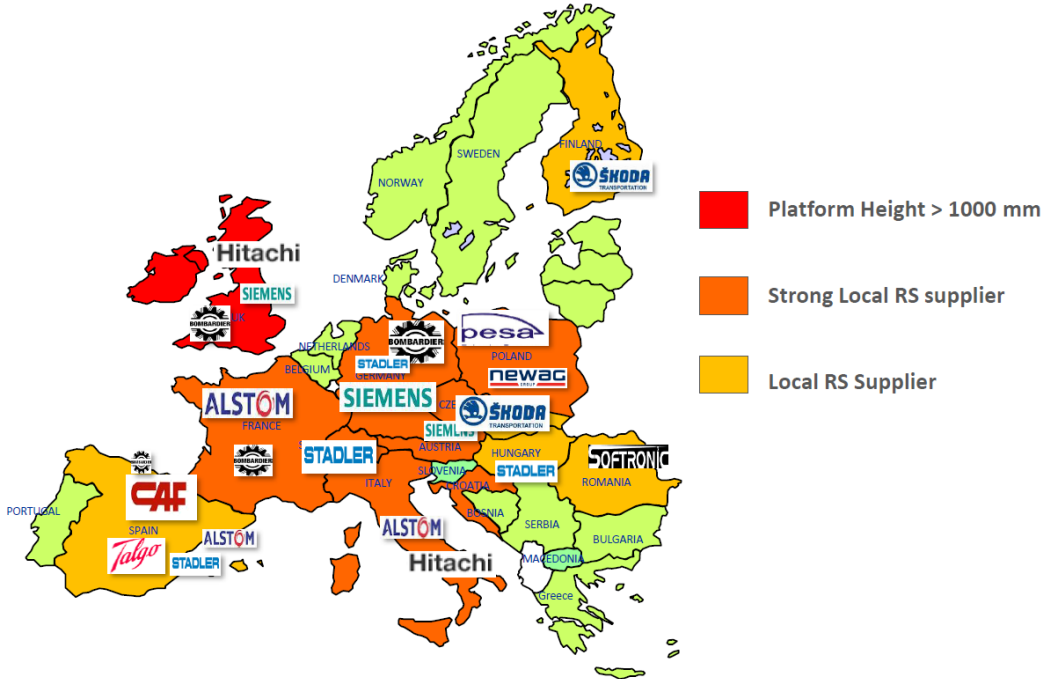


Figura 41. Fabricantes de trenes en Europa [5].

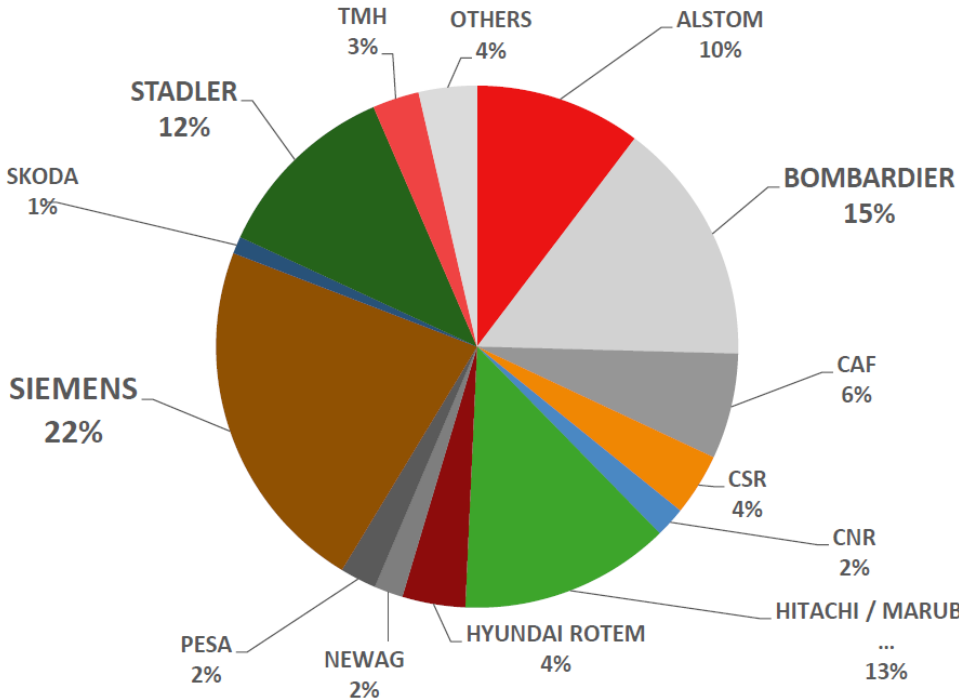
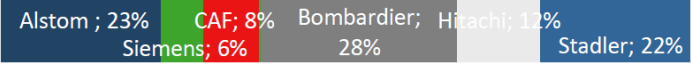
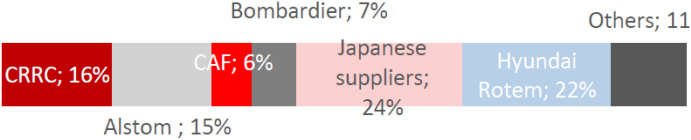
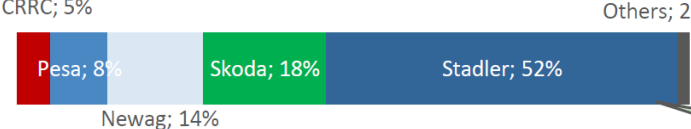
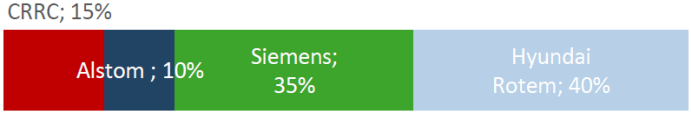

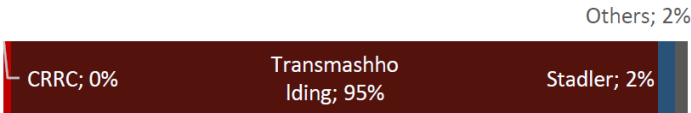



Figura 42. Presencia en el mercado mundial de los diferentes fabricantes de trenes de Cercanías.

En la siguiente tabla se puede observar la distribución específica de los diferentes fabricantes en cada una de las regiones, con el fin de mostrar qué fabricantes y en qué porcentaje aparecen en cada región.

Tabla 15. Porcentaje del mercado de cada fabricante en cada región del mundo.

Región	Tamaño mercado [Billones €]	% del Global	Gráfico
Europa del Oeste	7,37	59%	
APAC	2,48	16%	
Europa del Este	1,12	9%	
MENA	0,50	4%	
NAFTA	0,75	6%	
CIS	0,50	4%	
América Latina	0,13	1%	

A continuación, se analiza que es lo que está ofreciendo cada fabricante según las características que se han comentado.

Siemens

La tendencia de Siemens como fabricante es maneja en el segmento con soluciones mixtas y de un piso:



Figura 43. Material rodante de SIEMENS [13].

Alstom

La tendencia de Alstom como fabricante es moverse con soluciones de un piso en la mayoría del segmento, aunque también presenta soluciones de dos pisos:

Coradia X'Trapolis



Coradia Continental



Coradia iLint



Coradia Duplex



Figura 44. Material rodante de Alstom [4].

CAF

La tendencia de CAF como fabricante al principio fue desarrollando soluciones de un piso alto. Sin embargo, por la evolución del mercado comentada, actualmente está desarrollando soluciones de piso bajo para ganar en accesibilidad:

CIVIA vs CIVITY



Figura 45. Material rodante de CAF [10].

Stadler

La tendencia de Stadler como fabricante es manejarse con soluciones de un piso en la mayoría del segmento, aunque también presenta soluciones de dos pisos:



Figura 46. Material rodante de STADLER [6].

Otros

Cabe destacar la presencia de otros fabricantes como Pesa (Polonia), Newag (Polonia) o Skoda (República Checa).



Figura 47. Material rodante de otros fabricantes [14].

Nueva Oferta de RENFE

Cabe destacar las ofertas de Stadler y Alstom donde el tren combina la alta capacidad con la alta accesibilidad a través de coches 1 piso en los extremos y de 2 pisos los intermedios. Incluyen los últimos avances en comunicación como Wifi, Sistema Play Renfe, o pantallas digitales, entre otros.



Figura 48. Oferta de Stadler para la licitación de RENFE [6].



Figura 49. Oferta de Alstom para la licitación de RENFE [4].

2.2.4.3 Líneas generales

Como se ha visto en los apartados anteriores, el mercado del Cercanías es el de mayor volumen y crecimiento dentro del segmento “Mass Transit”. Se caracteriza por su alta competitividad entre fabricantes y por estar marcado históricamente por el coste, el plazo y la fiabilidad.

Sin embargo, desde que el ferrocarril se ha convertido en el núcleo de la estrategia de movilidad de las ciudades, el mercado actual del Cercanías está demandando una máxima capacidad y accesibilidad en las nuevas unidades. En los fabricantes que llevan más tiempo dentro del segmento, se puede observar una clara evolución. Ejemplo de ello es CAF que ha progresado del CIVIA de piso alto al CIVITY de piso bajo.



Figura 50. Trenes de CAF; Civia (izquierda) y CIVITY (derecha).

En el mercado se puede observar la tendencia a soluciones estandarizadas. Sin embargo, en el análisis de las diferentes soluciones de los competidores se ha visto como destaca la importancia de construir diferentes familias de plataformas en función de los mercados objetivo.

Se ha visto la importancia de ofrecer productos con disparidades significativas cuando se cambia de un mercado a otro. Esto se ha conseguido trabajando en la mejora de características técnicas como la tracción, la capacidad de pasajeros, las aplicaciones digitales o el mantenimiento predictivo.

Es importante diferenciar que a nivel de fabricante hay una clara intención de homogeneizar las soluciones de Cercanías y Regional por criterio de coste. En este sentido, se reutilizan plataformas para simplificar y reducir los números de referencia. Sin embargo, no es una demanda del mercado alinear estos dos modos de transporte. Si que es verdad que a nivel operación, existe una línea muy delgada entre uno y otro. Existen tramos de más de 20 km en redes de Cercanías como en la línea C2 y C8 de Madrid, entre Guadalajara y Alcalá de Henares, que se asemejan más a una línea regional. Sin embargo, ya cerca del centro les toca actuar como trenes de altas capacidades.

Por último, cabe destacar cómo la necesidad de mejorar la experiencia del pasajero está aumentando y son cada vez más las líneas de trabajo con el propósito de situar al usuario como centro de la operación.

3. NUEVAS NECESIDADES

Hasta aquí se ha analizado las razones por las cuales el ferrocarril es necesario y cómo, para la estrategia de movilidad de las ciudades, el Cercanías se presenta como sistema principal.

En este sentido, se ha profundizado en el concepto, entorno, elementos y necesidades principales de este medio de transporte con la finalidad de encontrar nuevas líneas de mejora dentro del mercado.

En este último apartado se define cómo debe evolucionar el segmento de Cercanías, indagando en el enfoque de poner al pasajero como centro de la operación. Para ello, se busca entender más de cerca al usuario de Cercanías analizando brevemente qué nuevas necesidades han podido surgir en la población a raíz de los grandes cambios vividos durante el último año y medio.

Finalmente, se recogerán todas las líneas de trabajo que se han encontrado durante el proyecto y se propondrá y bocetará una solución concreta de una de ellas.

3.1. Nuevo Contexto

Tras el entorno generado en estos últimos años, como consecuencia de diversas catástrofes naturales y de la situación de pandemia que se ha vivido y todo lo que ha derivado de ello, ha producido distintas necesidades en la población, sobre todo en la urbana, y, por lo tanto, en el transporte de Cercanías. Como evidencia de los cambios que se están viviendo, destacan el auge del teletrabajo, el uso constante de la mascarilla, la desconfianza generalizada a los sitios cerrados o la reducción de la movilidad urbana, entre otras.

A continuación, se indagará en las nuevas costumbres de la población, la nueva demanda y nuevas necesidades en este tipo de transporte.

Situación de la población

El análisis de la situación de la población que ha traído la pandemia se va a centrar en tres ejes: la **tecnología**, entendida como al conjunto de herramientas, aplicaciones, plataformas, dispositivos, nuevos materiales, etc.; la **higiene**, entendida como el uso de la mascarilla y la ventilación de los espacios; y el **bienestar psicológico**, entendido como la preocupación por la salud mental ante las nuevas situaciones.

Entorno a estos tres ejes es donde se ha considerado que se van a encontrar muchas líneas de trabajo futuras.

Tecnología

Si la pandemia hubiese ocurrido hace 15 años, el teletrabajo como se entiende hoy en día no se habría dado, ya que la situación de la tecnología hace una década estaba mucho más atrasada y su uso no se extendía a todos los ámbitos de la vida cotidiana. A medida que han pasado los años el nivel tecnológico ha aumentado de forma exponencial, aunque ello no se ha visto inmediatamente reflejado en su uso diario.

Con la llegada de la pandemia, se ha catalizado la fusión entre la población y la tecnología actual. Esto ha hecho posibles mejoras en, por ejemplo, las tareas diarias, las actividades laborales e incluso en las herramientas de trabajo. Esta aceleración que ha marcado la pandemia ha demostrado que la tendencia de los próximos años es a que la tecnología (entendida como

digitalización) tenga un papel mucho más importante, sobre todo, en el ámbito laboral y en el ocio.

Entendiendo bien esta tendencia, es lógico pensar que los nuevos diseños de trenes de Cercanías deben de seguir trabajando e investigando en esta línea. El nivel de entretenimiento ofrecido a bordo no será el mismo que en un Regional o un Tren de Alta Velocidad donde se pasa más tiempo, pero sí deberá de buscar soluciones que mejoren la experiencia del pasajero desde un punto de vista tecnológico. Ejemplo de ello son las últimas licitaciones, como la de RENFE, que exigen la presencia de una red Wifi en toda la composición.

En este punto, se pueden empezar a plantear nuevas líneas de trabajo que busquen introducir espacios dentro del tren donde se pueda dar: el teletrabajo, la carga múltiple de cualquier tipo dispositivo (patinetes eléctricos), o la ampliación de contenido de pequeños dispositivos como el móvil personal en pantallas más grandes, entre otras soluciones. Teniendo en cuenta siempre que la inclusión de estos nuevos lugares no perjudique la capacidad y accesibilidad del tren.

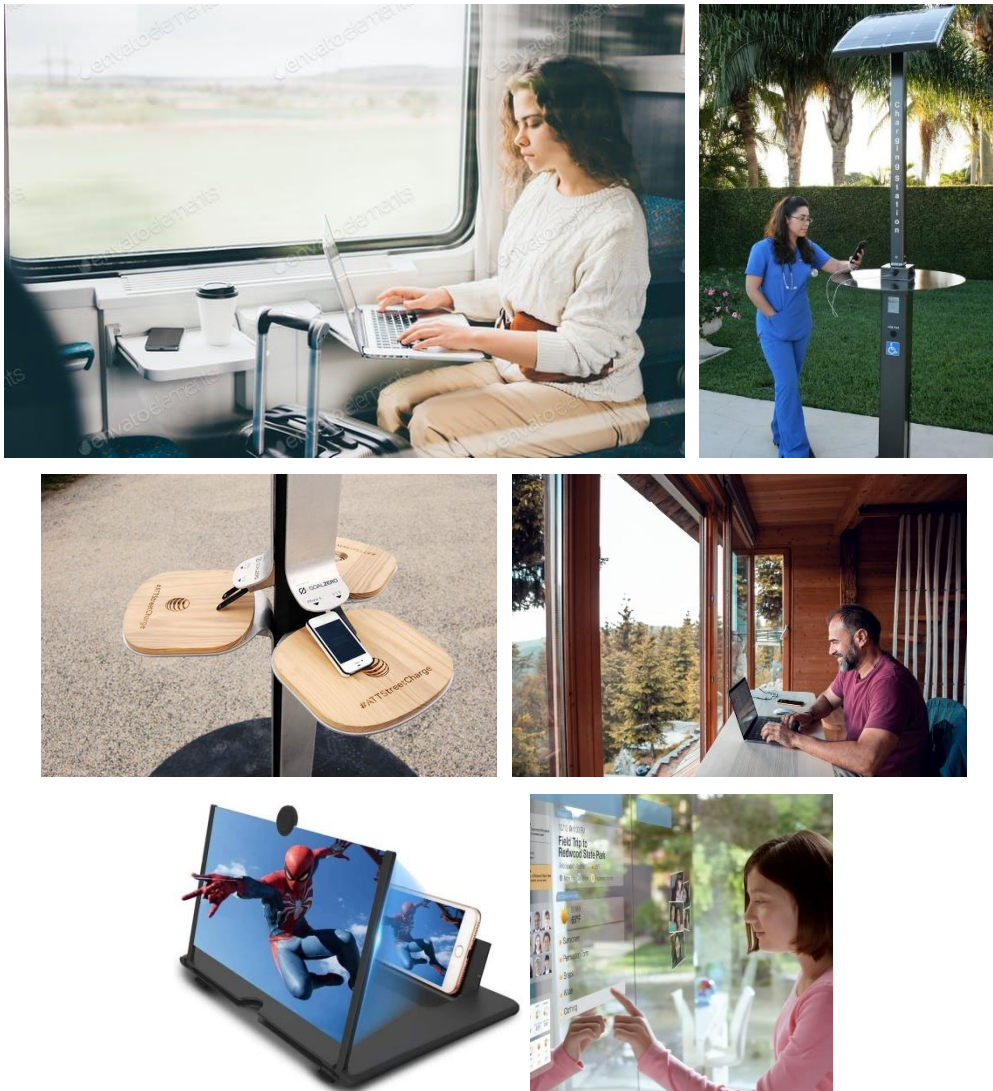


Figura 51. Líneas de trabajo futuras en trenes de Cercanías desde el punto de vista tecnológico.

Higiene

La situación de pandemia que se ha vivido en estos últimos tiempos no ha sido ni la primera ni será la última que se viva. Las consecuencias que han traído consigo la pandemia han creado un miedo generalizado en la población que tardará en apaciguarse y una temeridad a una repetición en un futuro no muy lejano.

Esta sensación generalizada en la población ha hecho que la percepción del riesgo se vea aumentada y se prolongue en el tiempo. De esta manera, la sociedad actual ya ha empezado a demandar requisitos preventivos en el ámbito de la higiene. Un ejemplo de ello es la creciente preocupación por la correcta ventilación de espacios cerrados, pudiendo ser esta forzada o libre.

Las líneas de investigación de las empresas para devolver la confianza al usuario se han centrado en cómo controlar o limitar los contagios, atacando a la causa raíz:

Inicialmente se estudió el contagio de Covid19 por contacto, pero sin embargo más adelante se evidenció que este no era un modo de transmisión. Soluciones como pintura antibacteriana en asideros, disposición de geles hidroalcohólicos o sistemas “contactless2 para apertura de puertas o aseos, por ahora se han dejado de implementar. Esto no quiere decir que este nuevo diseño interior sea necesario más adelante y tenga que ser desarrollado a raíz de futuras pandemias.

Actualmente, la principal línea de investigación se centra en los contagios por vía oral, ya que se ha demostrado que este es el modo de transmisión del Covid19. Los factores de contagio conocidos son: la fuerza de exhalación, la ventilación del entorno, el tiempo de exposición y la posición relativa al enfermo.

Type and level of group activity	Low occupancy			High occupancy		
	Outdoors and well ventilated	Indoors and well ventilated	Poorly ventilated	Outdoors and well ventilated	Indoors and well ventilated	Poorly ventilated
Wearing face coverings, contact for short time						
Silent	Low	Low	Low	Low	Low	Medium
Speaking	Low	Low	Low	Low	Low	Medium
Shouting, singing	Low	Low	Medium	Medium	Medium	High
Wearing face coverings, contact for prolonged time						
Silent	Low	Low	Medium	Low	Medium	High
Speaking	Low	* Low	Medium	* Medium	Medium	High
Shouting, singing	Low	Medium	High	Medium	High	High
No face coverings, contact for short time						
Silent	Low	Low	Medium	Medium	Medium	High
Speaking	Low	Medium	Medium	Medium	High	High
Shouting, singing	Medium	Medium	High	High	High	High
No face coverings, contact for prolonged time						
Silent	Low	Medium	High	Medium	High	High
Speaking	Medium	Medium	High	High	High	High
Shouting, singing	Medium	High	High	High	High	High

Risk of transmission

Low ■ Medium ■ High ■

* Borderline case that is highly dependent on quantitative definitions of distancing, number of individuals, and time of exposure

Figura 52. Riesgo de transmisión en lugares cerrados con baja y alta densidad [15].

Muchos son los esfuerzos que se han realizado para intentar disminuir esta transmisión: el uso de la mascarilla, la distancia social, la ventilación. Los dos primeros dependen, en mayor medida, de las decisiones individuales de cada persona; mientras que la ventilación recae sobre todo en el diseñador.

En los trenes de Cercanías, para fomentar el uso de la mascarilla y de mantener la distancia social se ha apelado a los usuarios mediante carteles, megafonía, información al pasajero, etc. buscando siempre que la transmisión de la información sea efectiva sin llegar a exasperar.

Por otro lado, en estos medios de transporte se viene investigando el potencial de la ventilación. En la Figura 52 se puede observar la bajada del riesgo de contagio en las diferentes situaciones que se pueden dar en un lugar de pública concurrencia a medida que mejora la ventilación.

De este punto se encuentran dos líneas de trabajo. Por un lado, mejorar la comunicación de información actualizada al pasajero, por ejemplo, del nivel de ocupación y ventilación de cada coche, a través de cartelería digital, pictogramas, megafonía, iluminación y demás formas existentes. Por otro lado, en mejorar los sistemas de entrada de aire exterior sin aumentar demasiado la resistencia al avance o colocar filtros de partículas que marquen el nivel de contaminación del aire en cada momento.

Bienestar psicológico

Tras el confinamiento domiciliario prolongado, la sensibilidad del usuario ha aumentado en situaciones que antes formaban parte de la normalidad. Un ejemplo de ello son las aglomeraciones, sobre todo en grandes urbes como Madrid.

En este sentido, las nuevas líneas de creación de espacios interiores deben de buscar el bienestar del pasajero a través del cuidado de la iluminación, visibilidad, distribución de los pasajeros (evitar aglomeraciones), creación de espacios diáfanos e incluso los sonidos. Buscar el bienestar psicológico es una herramienta crucial para fidelizar al viajero.

En definitiva, el trabajo en el interior de los coches de Cercanías debe de focalizarse en pasar de un diseño básico a transmitir más la sensación de ser un lugar relajado y tranquilo para atraer a nuevos usuarios, y la gente prefiera ir antes en tren que en coche.

En este sentido, líneas de estudio podrían ser la investigación de los mecanismos existentes y futuros para evitar las aglomeraciones y distribuir bien los pasajeros a lo largo del tren, jugar más aún con la iluminación para condicionar mejor el ambiente o introducir elementos como mesas que den más sensación de estar en un espacio de ocio como una cafetería.

Como ejemplo ilustrativo de modificación del diseño del espacio interior se puede observar en las siguientes imágenes la remodelación del Tren nocturno de largo recorrido de Amtrak. Trata de la modernización de los interiores de la flota de trenes de dos niveles "Superliner", en búsqueda de esta mejora comentada de la experiencia del pasajero. Dan servicio principalmente en las rutas del medio oeste, el sur y el oeste de E.E. U.U. Aunque es un tren que no se encuentra dentro del segmento "Mass Transit" se ha querido añadir como ejemplo de inspiración para la elaboración de la propuesta concreta final de este proyecto.

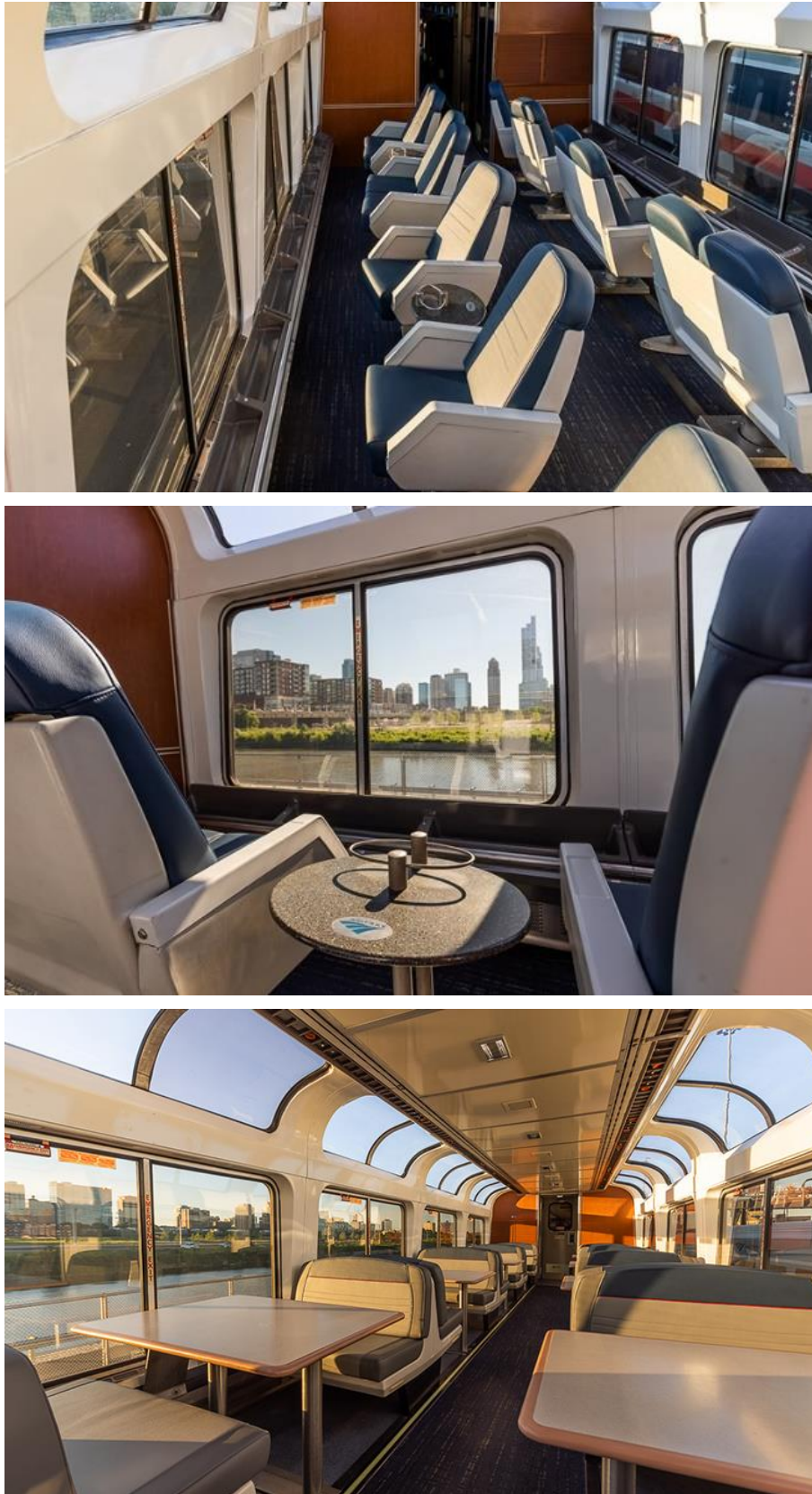


Figura 53. Remodelación del tren nocturno de largo recorrido de Amtrak [14].

Situación de la demanda

Tras las restricciones impuestas como respuesta a la pandemia vivida en España, la demanda en los diferentes modos de transporte se desplomó en más de un 90%. Desde la finalización de estas, la demanda ha ido aumentando, sin haber llegado a sus niveles previos a la pandemia. La normalidad parece ir ganando posiciones, sobre todo desde el inicio de 2021.

Hasta el punto de que el pasado viernes 7 de mayo, según los estudios del Consorcio Regional de Transportes, se alcanzó el récord de viajes en Metro, autobuses y Cercanías en la Comunidad de Madrid desde marzo de 2020. Se realizaron ese día 3.632.731 viajes, lo que supone haber recuperado la demanda habitual en condiciones pre-Covid en un 64,4 por ciento.

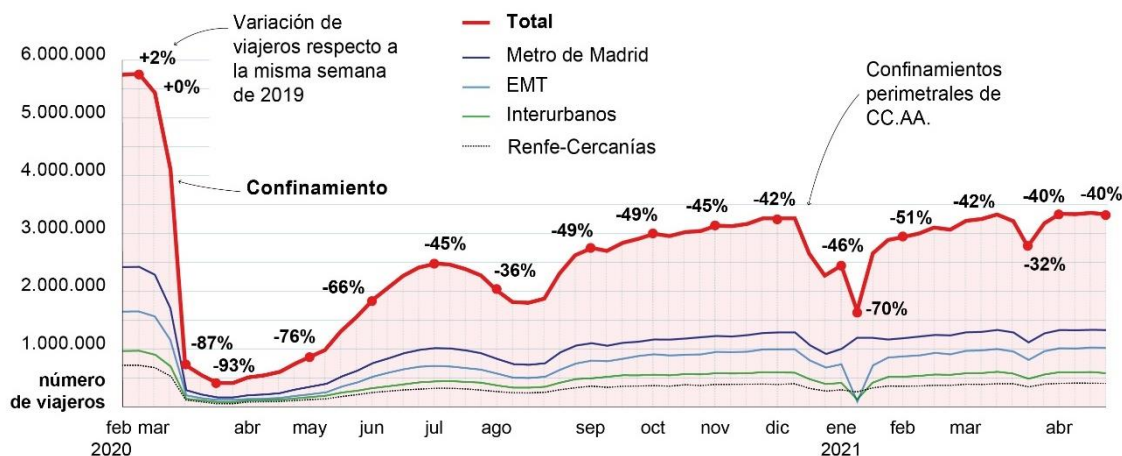


Figura 54. Evolución de la demanda de transporte media semanal (en semanas laborables en nº de viajeros) [16].

Como se ha venido comentando, la utilización del transporte público es la mejor forma de ver que los usuarios están volviendo a recuperar la confianza frente a los estragos del virus. Por los datos observados en la Figura 54 parece que la tendencia es positiva y alentadora.

Según los estudios, los medios de transporte ferroviarios han mostrado una recuperación más lenta que el transporte por carretera. Tanto el Cercanías de RENFE como el Metro se quedan en un 60,5 por ciento de incremento. Mientras que en la EMT y la red de interurbanos la recuperación ha sido mayor, 66,6 y 72,1 por ciento, respectivamente.

Estos niveles de demanda, pese a ser lejanos a los previos a la pandemia, hay que devolverlos a su estado inicial o incluso mejorarlos, consiguiendo que el pasajero se sienta seguro, confortable... en el tren. La situación actual respecto al coche, como se ha mencionado anteriormente, es crítica y no admite demora en su actuación. La ausencia de medidas a nivel institucional privilegia al coche, y la movilidad urbana no se puede volver a ver resentida como en la antigua normalidad. Además, se ha visto que la reducción del transporte por carretera ha traído consigo aspectos positivos, como la caída de los niveles de dióxido de nitrógeno a la mitad.

El proceso de recuperación de la demanda en el tren de Cercanías se enfrenta a retos como el teletrabajo, habiendo empresas que actualmente han implantado este modelo de forma indefinida, así como a la nueva corriente urbanista centrada en la creación de ciudades compactas, en las que los servicios principales se encuentran todos a menos de 15 minutos andando.

A pesar de que los niveles de demanda medios semanales todavía no sean los esperados, los picos de densidad en las horas punta siguen siendo prácticamente los mismos. Las nuevas líneas de trabajo en los trenes de Cercanías deben de seguir investigando en como aumentar la capacidad y mejorar la accesibilidad para rendir cada vez mejor a estas horas del día. A su vez, tienen que seguir trabajando en cómo devolver la confianza al usuario y conseguir una mayor atracción de este. En el siguiente apartado se resumen el conjunto de líneas de trabajo que se han reunido para poder llevar esto a cabo.

3.2. Nuevas líneas de trabajo

Tras el breve análisis que se ha realizado sobre las nuevas necesidades emergentes en la población a raíz de los grandes cambios vividos en este último tiempo, se ha podido acercar más el concepto del tren de Cercanías al usuario, en línea con el propósito de poner al pasajero como centro de la operación.

En este apartado, se van a recoger las diferentes líneas de trabajo que se han encontrado durante el proyecto encaminadas a mejorar la experiencia del usuario. Finalmente, se propone y esboza una posible solución concreta de una de ellas. Se encuentran las siguientes líneas:

Comunicación con el pasajero:

Los medios de transmisión y la propia información al pasajero deben de buscar un sistema de redes que mejore y actualice continuamente la comunicación con el pasajero.

Desde el punto de vista de los medios, se está trabajando en altavoces capaces de direccionar los mensajes acústicos, o en pantallas inteligentes dónde poder ver la información actualizada. Desde el punto de vista de la información, el pasajero demanda datos en vivo sobre el nivel de ocupación de cada coche, o sobre la calidad de la ventilación cerca del sitio donde se encuentra. Esto último se podría abordar colocando filtros de partículas en la red de aire acondicionado que marquen el nivel de contaminación del aire en cada momento.

Ejemplo de este tipo de comunicación inteligente es el sistema “*Mobility as a Service*” de RENFE, que además permite conectar con otros modos de transporte (tren, metro, autobús, taxi, VTC, patinetes, bicicletas y vehículo compartido) y realizar el proceso de planificación del viaje de origen a destino sin tener que salir de la aplicación.

No obstante, todos estos sistemas pueden tener la doble función de entretener a los pasajeros. Aunque la duración del trayecto no sea tan elevada como en un Tren Regional, el entretenimiento es una herramienta necesaria. Se están empezando a plantear soluciones para poder ampliar el propio contenido del móvil mediante proyección en pantallas.

Accesibilidad:

Se podría trabajar en buscar distribuir de forma inteligente a los pasajeros dentro de la composición sin que éste se dé cuenta. Es una necesidad que algunos operadores ya están trabajando sobre ello. En la actualidad, se ven líneas con las que programar el comportamiento humano a la hora de moverse dentro del tren. Pueden ser pautas muy sencillas cómo las que se muestran a continuación:



Figura 55. Distribución Interior de la UT-446 de RENFE.

Distribuir el mobiliario de tal manera que los sitios preferibles por la mayoría de los usuarios se encuentren en las zonas limítrofes donde se quiere realizar el reparto de personas. Al entrar en el coche y encontrarse con gente de frente, el ser humano suele tender a irse justo en la dirección contraria. Un ejemplo actual de esto son los asientos abatibles que se encuentran justo pegados a las puertas en las UT de RENFE: 446 y 447, aunque no fueron diseñados con esa intención.

Otro tipo de pauta sencilla para distribuir los pasajeros por la composición es el seguimiento de colores de forma inconsciente. Existen varios tipos de soluciones planteadas, como por ejemplo la que es a través de iluminación LED. El pasajero a su entrada por la puerta acaba decantándose por una de las dos direcciones según los colores iluminados a partir de un patrón.

Confort:

Se están planteando muchas soluciones en búsqueda de que el usuario del tren de Cercanías pueda tener la mejor experiencia posible. Algunas líneas de trabajo están orientadas a trabajar sobre la iluminación para poder acondicionar mejor el ambiente. Otras a profundizan en el diseño del mobiliario interior implementando materiales orgánicos con los que poder hacer diseños de forma sencilla que hasta ahora no se han hecho, sin afectar al mantenimiento.

Nuevas configuraciones con tecnologías futuristas son espacios completamente diáfanos y la aparición automática de los diferentes elementos; mesas y asientos, escondidos y protegidos en los carenados. El desbloqueo de este mobiliario podría ser a partir de la identificación personal aprovechando el método de los tornos de las estaciones. De esta manera, la experiencia del pasajero sería completamente única y se evitaría el vandalismo ya que todos los elementos serían utilizados con previa identificación.

En relación con la búsqueda de un mobiliario interior flexible se ha realizado la propuesta final de este proyecto.

Propuesta final

Se ha comentado como las mesas son un impedimento a la hora de entrar y salir de los asientos. Sin embargo, evitarlas su inclusión elimina completamente un lugar donde se podría dar una nueva relación con el usuario.

El desarrollo de una nueva actividad como el **teletrabajo** dentro de los trenes de Cercanías podría convertirse en uno de los aspectos clave para fidelizar pasajeros y dar un impulso a este modo de transporte frente al coche privado.

La costumbre de teletrabajar en trenes regionales y de alta velocidad cada vez se está dando más. Por qué razón no ocurriría lo mismo en los trenes de Cercanías, aunque el tiempo de duración sea menor.

A la hora de desarrollar el diseño no hay que olvidar que el tren de Cercanías ha estado, está y estará expuesto al vandalismo. Y cualquier tipo de mesa que se ponga deberá estar diseñada para soportar estos ataques y no afectar mucho al mantenimiento. Es por eso por lo que desde un primer momento se han descartado todo tipo de mesas plegables, o con elementos propensos al vandalismo.

En este sentido, se ha desarrollado la propuesta final con la intención de introducir elementos básicos y antivandálicos que den más sensación de estar en un espacio de ocio, como si de una cafetería se tratase. Además, se busca que estos elementos sean versátiles y puedan a su vez habilitar puntos de carga múltiple donde poder conectar cualquier tipo dispositivo; móviles, portátiles, patinetes eléctricos...

Para ello, se ha eliminado del espacio todas las alternativas de configuración de asientos existente que se pueden ver en la Figura 57: Flight mode, VIS a VIS y transversal. Y también, desaparece la posibilidad del portaequipaje.

Con la eliminación de estos elementos se ha empezado a elaborar los diseños de mobiliario interior que aparecen a continuación. La finalidad principal es obtener una mesa alta que sirva de apoyo para actividades como el teletrabajo.

La mesa no es igual a la que se está acostumbrado en un tren regional, son más altas de lo normal como se puede observar en la Figura 58. De esta manera, el número de personas que pueden ir “sentadas” es mayor que en una disposición VIS a VIS ya que esta nueva disposición ocupa menos superficie. Además, cuenta con centros de carga dónde poder enchufar cualquier tipo de dispositivo.

Los asientos han sido elaborados a partir de la inspiración obtenida de los asientos isquiotibiales que se encuentran en las unidades de Metro Madrid, como se puede observar en la Figura 56.



Figura 56. Asiento Isquiotibial Metro de Madrid.

Se puede jugar con los diferentes tipos de configuraciones que se muestran a continuación. Sin embargo, se cree que la disposición óptima es la que las mesas coinciden con las ventanas para obtener así máxima visibilidad.

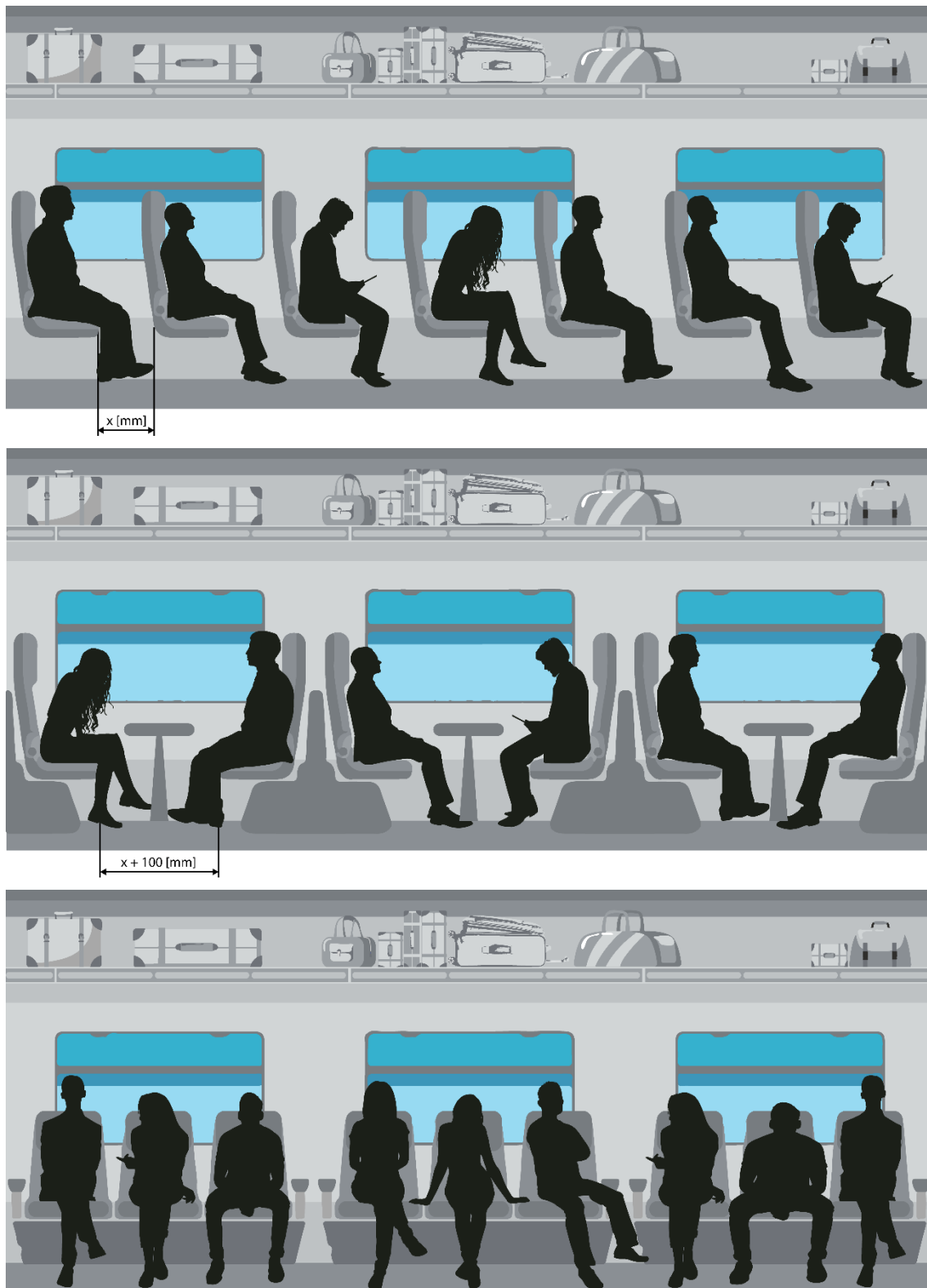


Figura 57. Bocetos de las diferentes configuraciones de asientos dentro de un mismo espacio.

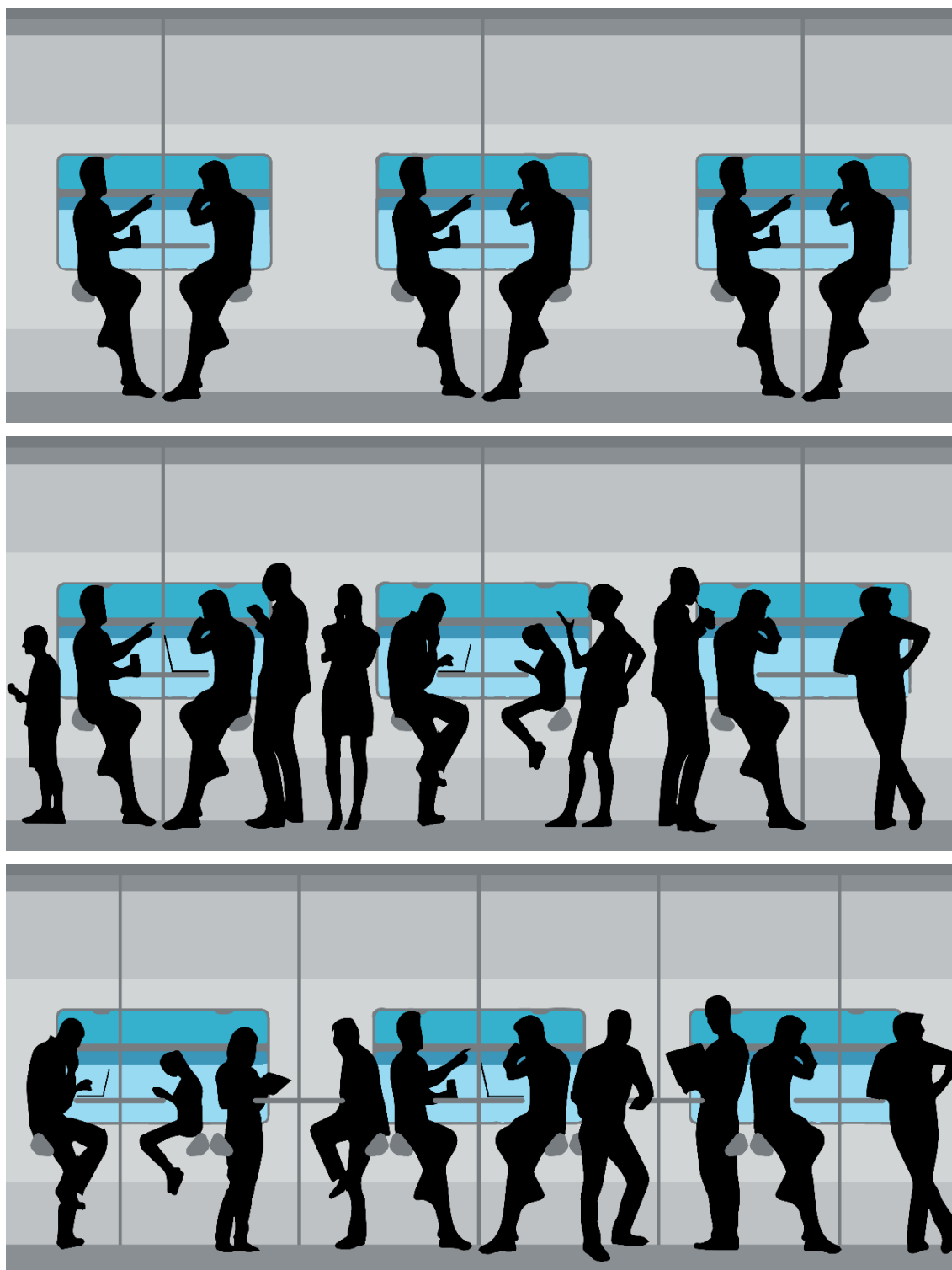


Figura 58. Bocetos de la propuesta final.

A continuación, se muestra los planos y un renderizado de cómo quedaría en una situación real. Se pueden observar la sensación de amplitud que transmiten. Así como de versatilidad y comodidad de los diferentes elementos que lo forman (puntos de carga, asideros...). Por último, cabe destacar que el diseño es robusto y sencillo para evitar ser vandalizados.

Cualquier duración de un trayecto de Cercanías es perfecta para ir aquí sentado, disfrutando de poder apoyar cualquier libro o herramienta de trabajo donde amortizar el tiempo invertido en el transporte.

Además, el espacio que deja de pasillo es idóneo para favorecer la transición por toda la composición y para que puedan ir gente de pie cómodamente en las horas pico de alta densidad.

En definitiva, es una solución que busca la máxima capacidad y accesibilidad, y a su vez es capaz de atraer a nuevos y antiguos usuarios al mejorar con una característica novedosa la experiencia del pasajero.

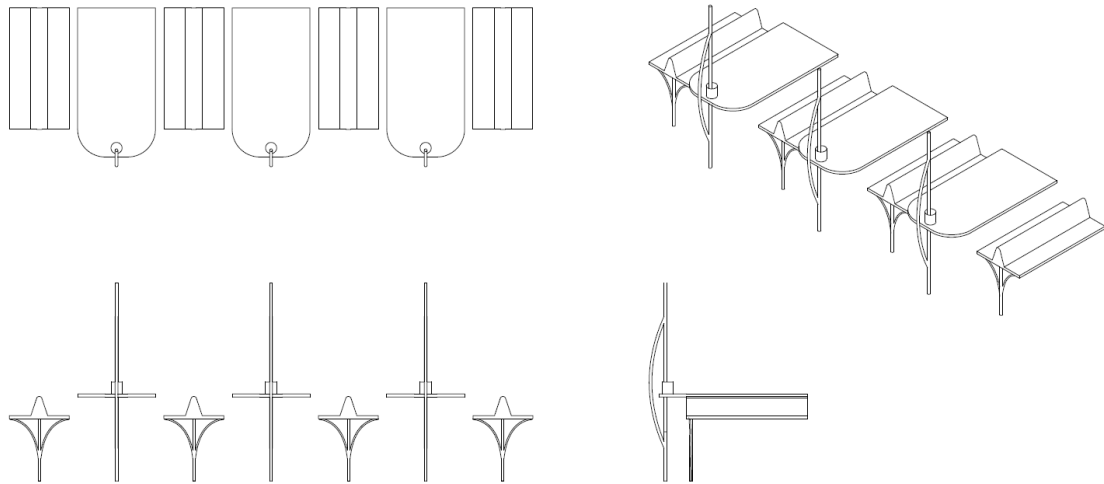


Figura 59. Planos de la propuesta final.



Figura 60. Render de la propuesta final

4. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

4.1. Conclusiones

La tendencia de la población es a volverse cada vez más urbana, y, por tanto, la necesidad de una movilidad sostenible dentro y fuera de las ciudades es más urgente. Toda esta situación está muy agravada porque la principal alternativa de transporte está siendo el coche privado, con todo lo que supone para un núcleo urbano: saturación de carreteras, nivel de emisiones elevado, gasto de energía, mayor ruido...

Los medios de transporte ferroviarios responden mejor en términos de capacidad, eficiencia energética y emisión de gases de efecto invernadero que los modos de transporte por carretera. Es por eso, por lo que el Tranvía, el Metro y el Cercanías se presentan como la articulación principal de la estrategia de movilidad de las ciudades.

Históricamente las características principales de un tren de Cercanías han sido la fiabilidad y la eficiencia energética. Desde que se ha convertido en el transporte principal para unir el centro con las periferias de las ciudades, no se ha dejado de profundizar en cómo maximizar más la capacidad y la accesibilidad. Además, se ha visto como, aunque la demanda este por debajo de los niveles esperados, el tren de Cercanías tiene las mismas exigencias de capacidad en las horas punta.

En la competencia con el coche, es muy difícil que la población perciba el coste indirecto que le está suponiendo usarlo. Para poder atraer a la gente, es de vital importancia diseñar poniendo al usuario como centro de la operación. En este sentido, se debe buscar mejorar todo lo posible en la experiencia del usuario con formas nuevas de comunicarse, de acercarse al usuario a través del mobiliario interior, por ejemplo. Esta búsqueda de fidelización del usuario es una forma muy potente de ganar usuarios al coche y, por consiguiente, provocar una mejora en las ciudades en términos de movilidad.

Se puede gastar mucho presupuesto en diseñar, fabricar y poner en servicio un tren excelente de Cercanías, con características y prestaciones únicas. Sin embargo, todo ese dinero no servirá de nada si no existe una sincronía con las estaciones. La capacidad del tren y el dimensionamiento del transporte vertical de las estaciones deben de estar relacionados con el fin de evitar problemas de capacidad como el que se puede ver en la Figura 61.



Figura 61. Situación de saturación máxima en un andén de la estación de Atocha.

Otros ejemplos relacionados con el anterior son modos de transporte que, a pesar de estar bien diseñado en capacidad, tener un gran potencial para atraer a nuevos usuarios y un material rodante competente, el resultado es una demanda más baja de la esperada. Esto es debido muchas veces a problemas externos, incluso ajenos al sistema. Ejemplo de ello se encuentra en la ciudad de Madrid, donde la usabilidad de la red de autobuses de la EMT es peor en comparación con la red de metro debido a una complejidad de uso y un aspecto mucho menos amigable del plano de paradas y líneas.

Con estos ejemplos se quiere ilustrar una de las conclusiones más importantes de este trabajo fin de máster. Los trenes de Cercanías, y cualquier modo de transporte ferroviario está inmerso en un sistema dónde son muchos los componentes interrelacionados estrechamente, y muchas las personas que participan en su diseño. Una buena gobernanza en el sistema siempre dará buenos resultados.

4.2. Bibliografía

- [1] OMM, «Observatorio de la Movilidad Metropolitana»: <http://www.observatoriomovilidad.es/es/inicio.html>.
- [2] V. R. Vuchic, *Transportation for Livable Cities*, Rutgers Center for Urban Policy Research, 1999.
- [3] F. Sunyer Mac Lennan, *Material de clase de Ferrocarriles metropolitanos, urbanos y de cercanías*, Asignatura del Máster en Sistemas Ferroviarios.
- [4] ALSTOM, «Alstom,» 1928: <https://www.alstom.com/>.
- [5] TALGO, *Documentación y archivos de la empresa*, 2021.
- [6] STADLER, «Stadler Rail AG,» 1942: <https://www.stadlerrail.com/en/>.
- [7] TALGO, «Patentes Talgo,» 1942: <https://www.talgo.com/es/>.
- [8] RENFE, «Operador de trenes de Cercanías en España,» 2005: <https://www.renfe.com/es/es>.
- [9] Ferromedia, «Trenvista,» 2021: <https://www.trenvista.net/>.
- [10] CAF, «CAF, Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles, S.A.,» 1917: <https://www.caf.net/es/index.php>.
- [11] CIA, «The World Factbook,» 2021: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/railways/country-comparison>.
- [12] BOMBARDIER, «Bombardier»: <https://bombardier.com/en>.
- [13] SIEMENS, «Siemens Mobility»: <https://www.mobility.siemens.com/es/es.html>.
- [14] GlobalRailwayReview, «GLOBAL RAILWAY REVIEW,» 18 Junio 2021: <https://www.globalrailwayreview.com/>.
- [15] BMJ, «British Journal of Medicine»: <https://www.bmj.com/>.
- [16] CRTM, «Consorcio Regional de Transportes»: <https://www.crtm.es/>.
- [17] T. E. R. Industry, «UNIFE,» 1991: <https://www.unife.org/>.
- [18] D. Guerrero, «LA VANGUARDIA,» 17 03 2021: <https://www.lavanguardia.com/local/barcelona/20210317/6442913/nuevos-trenes-rodalies-imagenes-alstom-stadler.html#foto-1>.
- [19] CRRC, «CRRC Corporation Limited,» 2015: <https://www.crrcgc.cc/en>.

