



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA EN ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de la red ferroviaria de
cercanías de Madrid

Autor:

Iñigo Juan García Arrate

Tutor: Marta Posada Calvo

Dpto de Organización de Empresas

Agradecimientos

En primer lugar, querría agradecer a mi tutora, Marta Posada Calvo, sin la cual no podría haber realizado este trabajo, por su dedicación, su esfuerzo, su amabilidad y por toda la atención que me ha dedicado.

A mis padres, Carlos y Nieves, sin los que no habría sido posible llegar hasta aquí, y que siempre han estado a mi lado para aconsejarme durante estos años.

A mi hermano, David, por toda la ayuda, el tiempo y por ser mi modelo a seguir.

A mis amigos más cercanos, los de siempre que, de un modo u otro también formáis parte de esto.

Han sido años de mucho esfuerzo, pero con vuestra ayuda todo ha sido mucho más fácil.

Gracias a todos.

Resumen

Este trabajo analiza la red de Cercanías de Madrid, a través de un enfoque basado en la teoría de grafos, con el objetivo de identificar puntos críticos y proponer soluciones que optimicen su funcionamiento. Se estudian las propiedades topológicas de la red ferroviaria, evaluando su conectividad, centralidad y robustez. Los resultados muestran que la red de Cercanías de Madrid presenta una alta dependencia de ciertos nodos estratégicos, lo que la hace vulnerable a interrupciones en puntos clave. Estos resultados se comparan la red de Cercanías con otras redes ferroviarias de referencia. Este análisis ofrece una visión integral de la situación actual de la red de Cercanías de Madrid para facilitar futuras soluciones que contribuyan a mejorar su eficiencia y sostenibilidad en el futuro.

Palabras clave: Cercanías Madrid, Renfe, movilidad urbana, análisis de redes, conectividad, sostenibilidad, eficiencia ferroviaria.

Abstract:

This article analyzes Madrid's commuter rail network using a graph-theoretic approach, with the aim of identifying critical points and proposing solutions to optimize its operation. The topological properties of the rail network are studied, assessing its connectivity, centrality, and robustness. The findings indicate that Madrid's commuter rail network is highly dependent on certain strategic nodes, making it vulnerable to disruptions at key points. The results are compared with the commuter rail network with other benchmark rail networks. This analysis provides a comprehensive overview of the current state of the Madrid commuter rail network to facilitate future solutions that will contribute to improving its efficiency and sustainability in the future.

Key words: Madrid commuter rail, Renfe, urban mobility, network analysis, connectivity, sustainability, railway efficiency.

Índice de contenidos

Índice de contenidos	1
Índice de Ilustraciones	5
Índice de Tablas.....	9
1. Introducción	11
1.1. Contexto	11
1.2. Motivación	11
1.3. Objetivo	12
1.4. Estructura	12
2. Renfe en el contexto ferroviario nacional.....	15
2.1. Introducción.....	15
2.2. Situación actual del sector ferroviario en España	15
2.2.1. Situación ADIF.....	15
2.2.2. Situación Renfe	19
2.2.3. Liberalización del sector ferroviario: horizonte 2030	21
2.2.4. Alta velocidad y conectividad nacional	22
2.2.5. Cercanías y movilidad metropolitana	24
2.2.6. Internacionales Transporte de mercancías	25
2.2.7. Transporte de mercancías.....	26
2.2.8. Infraestructura de soporte.....	27
2.3. Resumen estratégico Renfe.....	28
2.3.1. Contexto	28
2.3.2. Modelo de negocio actual	29
2.3.3. Análisis interno y externo	32
2.3.4. Estrategias propuestas y proyecciones futuras	33
3. Fundamentos para el análisis de redes	37
3.1. Introducción.....	37
3.2. Redes: Propiedades.....	37
3.2.1. Grado	38
3.2.2. Densidad.....	40
3.2.3. Paso medio	41

3.2.4.	Diámetro y Excentricidad	42
3.2.5.	Clustering	43
3.2.6.	Comunidades.....	45
3.2.7.	Pagerank	47
3.2.8.	Hubs y Autoridad	48
3.2.9.	Centralidad y Prestigio	50
3.2.10.	Robustez	54
3.3.	Gephi	55
3.3.1.	Características generales	55
3.3.2.	Aplicaciones de Gephi	56
3.3.3.	Funcionalidades avanzadas de Gephi.....	56
3.3.4.	Optimización de rendimiento	56
3.3.5.	Comunidad y soporte	57
3.3.6.	Gephi como herramienta	57
4.	La red de cercanías de Madrid	59
4.1.	Introducción.....	59
4.2.	Análisis de la conectividad en la red ferroviaria española para el transporte de pasajeros	59
4.2.1.	Alcance red ADIF	60
4.2.2.	Nodos red española.....	61
4.3.	Análisis de la conectividad en la red cercanías de Madrid	61
4.3.1.	Nodos de la red cercanías de Madrid	61
4.3.2.	Líneas de cercanías de Renfe Madrid.....	62
4.4.	Propiedades de la red cercanías de Madrid.....	65
4.4.1.	Grado	65
4.4.2.	Densidad.....	66
4.4.3.	Paso Medio.....	67
4.4.4.	Diámetro y Excentricidad	67
4.4.5.	Clustering	68
4.4.6.	Modularidad	69
4.4.7.	PageRank	70
4.4.8.	HUBS	71
4.4.9.	Centralidad Betweenness	72
4.4.10.	Centralidad Eigenvector.....	73
4.5.	Robustez general	74
5.	Estudio económico y de sostenibilidad	77

5.1.	Estudio económico.....	77
5.1.1.	Costes directos	77
5.1.2.	Costes indirectos.....	81
5.1.3.	Costes totales y precio de venta	81
5.2.	Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	82
6.	Conclusiones y extensiones	85
6.1.	Conclusiones	85
6.1.1.	Optimización de la Red y Conectividad.....	85
6.1.2.	Sostenibilidad y expansión.....	85
6.2.	Extensiones futuras	86
	BIBLIOGRAFÍA	89
	Anexo 1. Gráfico Nodos Gephi.....	93
	Anexo 2. Gráfico Aristas Gephi	95
	Anexo 3. Centralidad y betweenness de las estaciones.....	99
	Anexo 4. Documento Gephi	101

Índice de Ilustraciones

<i>Figura 1 - Red Nacional ADIF. Fuente: ADIF.....</i>	16
<i>Figura 2 - Anchos de vía. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021</i>	18
<i>Figura 3 - Distribución servicios transporte. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021</i>	18
<i>Figura 4 - Evolución número de pasajeros: 2005-2021. Fuente: Informe 2022, Ministerio de Transporte.....</i>	19
<i>Figura 5 - Evolución pasajeros Cercanías: 2005-2021. Fuente: Informe 2022, Ministerio de Transporte.....</i>	20
<i>Figura 6 – Distribución Precios por Operadoras trayecto MAD-BCN Fuente: CNMC22</i>	
<i>Figura 7 - Evolución Media y Larga Distancia:2000-2021. Fuente: Informe 2022, Ministerio de Transporte.....</i>	23
<i>Figura 8 – Porcentaje de utilización servicios por pasajeros y kilómetros de vía por servicio. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021.....</i>	25
<i>Figura 9 - Crecimiento redes de velocidad UE: 1985-2017. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021.....</i>	26
<i>Figura 10 - Evolución tráfico de mercancías. Fuente: Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana</i>	27
<i>Figura 11 - Gráfico inversión infraestructuras países. Fuente: El orden mundial EOM</i>	27
<i>Figura 12 - Talleres Renfe. Fuente: Renfe</i>	28
<i>Figura 13 - Oferta de servicios por trenes. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021</i>	29
<i>Figura 14 - Gráfico interés clientes Renfe. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021</i>	30
<i>Figura 15 - Aplicación móvil Renfe. Fuente: Renfe</i>	31
<i>Figura 16 - Encuesta de satisfacción clientes. Fuente: Renfe</i>	31
<i>Figura 17 - Gráfico distribución de gastos. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021</i>	32
<i>Figura 18 - Grafismo plan estratégico Renfe. Fuente: Plan estratégico Rente</i>	34
<i>Figura 19 - Ejemplo sencillo de red no dirigida</i>	38

Figura 20 - Ejemplo de distribución de grado en la red. Fuente: Delgado (2014) ...	39
Figura 21 - Ejemplo de distribución de componentes conexas en la red. Fuente: Delgado (2014).....	41
Figura 22 - Ejemplo excentricidad de la red. Fuente: Delgado (2014).....	43
Figura 23 - Ejemplo de distribución de clustering en la red. Fuente: Delgado (2014).....	44
Figura 24 - Ejemplo de red 8 nodos con dos comunidades. Fuente: Delgado (2014).....	45
Figura 25 - Red de relaciones entre adolescentes americanos en los institutos. Fuente: Currarini (2009)	46
Figura 26 - Ejemplo de distribución de modularidad en la red. Fuente: Delgado (2014).....	47
Figura 27 - Ejemplo de distribución de pageRank en la red. Fuente: Delgado (2014).....	48
Figura 28 - Ejemplo de distribución de hubs en la red. Fuente: Delgado (2014)....	49
Figura 29 - Red de Barabási-Albert. Fuente: Delgado (2014).....	50
Figura 30 - Distribución de hubs en la red. Fuente: Delgado (2014)	50
Figura 31 - Distribución de centralidad de grado en la red. Fuente: Delgado (2014).....	52
Figura 32 - Distribución de centralidad closeness en la red. Fuente: Delgado (2014)	53
Figura 33 - Distribución de centralidad betweenness en la red. Fuente: Delgado (2014)	53
Figura 34 - Distribución de centralidad eigenvector en la red. Fuente: Delgado (2014)	54
Figura 35 - Red Ferroviaria Española AV. Fuente – Renfe	60
Figura 36 - Red Cercanías Madrid, Fuente: Renfe	64
<i>Figura 37 - Red Cercanías Madrid Gephi, Fuente – Elaboración Propia</i>	64
Figura 38 - Distribución del Grado.	66
Figura 39 - Distribución excentricidad.	68
Figura 40 - Distribución Clustering.....	69
Figura 41 - Modularidad Factor 1.....	69
Figura 42 - Modularidad Factor 0.5.	70
Figura 43 - Modularidad Factor 1.5.	70

Figura 44 - Distribución PageRank.....	71
Figura 45 – HUBS.....	72
Figura 46 - Betweenness Centrality.	73
Figura 47 - Eigenvector Centrality.	73
Figura 48 - Gráfico Robusted Cercanías Madrid.....	75
Figura 49 - Gráfico Robusted Metro Washinton DC y de Tokio. Fuente: Wang (2017)	75
Figura 51- Representación ODS. Fuente: Naciones Unidas.....	83

Índice de Tablas

Tabla 1 - Propiedades de conectividad la red. Fuente: Delgado (2014)	43
Tabla 2 - Clustering de la red. Fuente: Delgado (2014)	44
Tabla 3 - Modularidad, Hubs y PageRank de la red. Fuente: Delgado (2014).....	47
Tabla 4 - Valores de centralidad de cada nodo. Fuente: Delgado (2014)	51
Tabla 5 - Valores estudio robustez red cercanías. Fuente - Elaboración propia.....	74
Tabla 6 - Coste anual de personal. Fuente - Elaboración propia	78
Tabla 7 - Días efectivos. Fuente - Elaboración propia.....	78
Tabla 8 - Total horas dedicadas. Fuente - Elaboración propia	79
Tabla 9 - Coste material amortizable. Fuente - Elaboración propia.....	80
Tabla 10 - Coste material consumible. Fuente - Elaboración propia	80
Tabla 11 Costes directos. Fuente - Elaboración propia	81
Tabla 12 - Costes indirectos. Fuente - Elaboración propia	81
Tabla 13 - Costes Totales. Fuente - Elaboración propia	82

1. Introducción

1.1. Contexto

Renfe y Adif son los pilares del sistema ferroviario en España. Renfe es la encargada de operar los trenes, mientras que Adif gestiona la infraestructura, incluyendo estaciones y vías. Juntas, permiten que millones de personas se desplacen a diario, especialmente en grandes ciudades como Madrid, donde la red de Cercanías es clave para la movilidad.

Madrid cuenta con una de las redes de Cercanías más grandes del país, conectando la capital con municipios cercanos y facilitando el acceso al centro sin necesidad de usar el coche. Sin embargo, la saturación, las averías y los retrasos han generado críticas en los últimos años. Al mismo tiempo, la alta velocidad ha transformado el transporte de larga distancia, pero sigue dependiendo de la infraestructura y la coordinación entre ambos organismos.

El papel de Renfe y Adif va más allá del transporte. Son fundamentales para la economía, reducen la congestión en carreteras y contribuyen a un modelo de movilidad más sostenible. Por eso, analizar su funcionamiento y detectar sus puntos débiles es esencial para mejorar la experiencia de los usuarios y garantizar un servicio fiable.

1.2. Motivación

En septiembre de 2024, una avería en la estación de Atocha causó retrasos en varios trenes de alta velocidad, afectando a miles de pasajeros. El incidente, recogido por la prensa, dejó en evidencia problemas en la gestión de incidencias y en la infraestructura ferroviaria. Esta situación generó muchas quejas y frustración entre los viajeros, pero también abrió el debate sobre la capacidad del sistema para responder a fallos inesperados.

Este tipo de problemas no son aislados. Las incidencias en Cercanías y en los trenes de larga distancia en Madrid han sido una constante en los últimos años, afectando la confianza de los usuarios y la calidad del servicio. La idea de este trabajo surge de la necesidad de analizar las causas de estas averías y proponer soluciones que puedan mejorar la fiabilidad del sistema ferroviario.

El transporte público es clave para el día a día en Madrid. Millones de personas dependen de él para ir a trabajar o estudiar. Cuando hay fallos, la movilidad de toda la ciudad se resiente. Por eso, estudiar la red ferroviaria y plantear mejoras no solo tiene un interés técnico, sino también un impacto directo en la vida de las personas.

1.3. Objetivo

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) es realizar un estudio detallado de la red de Cercanías de Madrid, con el fin de analizar sus características estructurales, operativas y su impacto en la movilidad urbana y metropolitana. Dada la relevancia de esta red para la Comunidad de Madrid, que conecta sus principales núcleos urbanos con zonas periféricas y otras provincias cercanas, se busca comprender cómo las propiedades de la red influyen en la eficiencia de los flujos de pasajeros, la conectividad y la sostenibilidad del sistema.

Para ello, se emplearán herramientas de análisis de redes, como el estudio de la centralidad de nodos, la densidad de la red y el clustering, entre otras propiedades, que permitirán identificar los nodos más relevantes y cómo estos afectan a la distribución de los servicios. Este enfoque tiene como propósito valorar aspectos de la red, identificando posibles áreas de mejora.

De forma paralela, se llevará a cabo un análisis superficial del sector ferroviario en España, con especial atención al sistema ferroviario de Cercanías y su evolución. A través de la revisión de datos históricos y el contexto actual del sistema de transporte ferroviario en el país, se establecerán las principales características de la red de Cercanías de Madrid dentro del panorama ferroviario español. Este análisis permitirá contextualizar el estudio de la red madrileña, destacando su importancia dentro del sector ferroviario y su contribución al sistema de transporte público en el país.

El estudio no solo abordará los aspectos técnicos y operativos de la red de Cercanías, sino también su papel social, al servir como una pieza clave en la movilidad de miles de personas, facilitando el acceso a lugares de trabajo, educación y otros servicios. A través de esta investigación, se buscará aportar propuestas de mejora en la gestión y expansión de la red para optimizar su capacidad, eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

1.4. Estructura

Esta memoria se organiza en tres capítulos principales, además de la introducción, un estudio económico, las conclusiones, la bibliografía y los anexos. Cada sección está diseñada para abordar de manera estructurada los diferentes aspectos relevantes del análisis de la red de Cercanías de Madrid y el contexto ferroviario español.

En el capítulo 2 se analiza la situación de Renfe en el sector ferroviario español. Este análisis ocupa una parte importante del trabajo. Se examinan la posición de la empresa dentro del sistema ferroviario nacional, su interacción con ADIF, y el impacto de la liberalización del sector ferroviario en España. Este capítulo también explora el papel de Renfe en la alta velocidad, la conectividad nacional y, específicamente, en los servicios de Cercanías, que son fundamentales para la movilidad metropolitana. Además, se considera la infraestructura que soporta la red ferroviaria, así como el sector del transporte internacional de mercancías.

La teoría de redes y su aplicación en el análisis de la red de Cercanías es otro aspecto clave del trabajo. En el capítulo 3 se profundiza en las principales propiedades de las

redes, tales como el grado, la densidad, la centralidad, el PageRank y la modularidad, que permiten obtener una visión detallada de la estructura de la red y los flujos de pasajeros. Estas propiedades se aplican al análisis específico de la red de Cercanías de Madrid, utilizando herramientas avanzadas como el software Gephi para la visualización y el análisis de la red. La sección describe cómo estas herramientas contribuyen a la identificación de los puntos más críticos y las posibles mejoras en la operativa de la red.

El análisis de la red de Cercanías de Madrid se presenta de forma detallada en el capítulo 4, donde se describen las principales líneas y nodos que la componen. Se aborda la conectividad de la red, poniendo especial énfasis en los puntos clave. Además, se realizan análisis cuantitativos y cualitativos de las propiedades de la red, con el objetivo de identificar áreas de mejora en términos de eficiencia y capacidad.

El trabajo concluye con una estimación del coste que ha supuesto realizar este estudio y un capítulo de conclusiones, donde se destacan los principales hallazgos obtenidos a lo largo del estudio, y se presentan las posibles extensiones y líneas futuras de investigación.

Por último, el trabajo se completa con la bibliografía utilizada, que incluye referencias a estudios académicos, informes técnicos y documentación relevante para el desarrollo del TFG.

Los cuatro anexos incluyen datos adicionales, gráficos y resultados detallados que complementan los análisis realizados. El Anexo 1: Gráfico Nodos Gephi, contiene una tabla con los nodos de la red y el Anexo 2: Gráfico Aristas Gephi, contiene una tabla con los enlaces de la red. Ambos anexos se cargan en Gephi para generar la red Cercanías de Madrid. Dichos anexos se han adjuntado en formato Excel para facilitar su consulta y análisis. El Anexo 3 se incluyen algunos resultados de la red con criterios añadidos a los nodos utilizados en el estudio. El Anexo 4 contiene el archivo de Gephi (GephiMadrid.gephi) con el desarrollo de la red de Cercanías de Madrid.

2. Renfe en el contexto ferroviario nacional

2.1. Introducción

Renfe es una de las principales empresas de transporte ferroviario en España, y su estructura y actividades son clave para entender cómo funciona. En este análisis, se presenta cómo Renfe se conecta tanto dentro de España como con otros países, lo que le permite ofrecer un servicio de transporte eficiente. También se presentarán los principales retos que enfrenta, como la competencia, los cambios tecnológicos y las demandas de los usuarios.

Renfe tiene que adaptarse constantemente a un entorno muy cambiante. Por eso, ha adoptado varias estrategias para afrontar estos desafíos. La compañía ha invertido en nuevas tecnologías para hacer sus procesos más eficientes y sostenibles, además de mejorar la experiencia de los pasajeros. A largo plazo, buscan asegurar que su funcionamiento sea rentable y respetuoso con el medio ambiente.

Además, habrá referencias constantes a la operadora Adif ya que es un miembro necesario para la operativa de la empresa y no podría ejercer sus labores sin las infraestructuras que proporciona, en primer lugar, contextualizaremos sobre esta administradora.

2.2. Situación actual del sector ferroviario en España

2.2.1. Situación ADIF

El Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) es la entidad pública española responsable de la gestión y el desarrollo de la infraestructura ferroviaria en España. Su misión principal es garantizar la disponibilidad y el óptimo estado de la red ferroviaria, facilitando el acceso a los diferentes operadores y promoviendo un transporte seguro, eficiente y sostenible.

Para visualizar la distribución y alcance de esta red, ADIF pone a disposición un mapa detallado (ver Figura 1). Este mapa permite a los usuarios explorar las diferentes líneas ferroviarias, identificar las estaciones y comprender la interconexión entre las distintas rutas. Además, ADIF proporciona datos actualizados sobre la longitud total de las líneas, el número de estaciones operativas y otros aspectos relevantes de la infraestructura. Esta información es esencial para comprender la magnitud y complejidad de la red ferroviaria española (ADIF, 2024).

La red gestionada por ADIF es una de las más extensas y complejas de Europa, abarcando tanto líneas de alta velocidad como convencionales. Esta diversidad implica la coexistencia de diferentes anchos de vía y sistemas de señalización, lo que añade complejidad a su gestión y mantenimiento. Para el período 2022-2026, ADIF ha planificado una inversión aproximada de 24.100 millones de euros en infraestructuras

ferroviarias, destinando más de la mitad a ejes convencionales, Cercanías y mercancías. Estas inversiones buscan modernizar la red, mejorar la capacidad y garantizar la fiabilidad del sistema ferroviario (ADIF, 2024).

Figura 1 - Red Nacional ADIF. Fuente: ADIF



ADIF cumple con funciones esenciales en el sector ferroviario, destacando la planificación, construcción y mantenimiento de infraestructuras. Además, gestiona el acceso a la red por parte de los operadores, asegurando su eficiencia y seguridad:

- Gestión de Infraestructuras: Supervisa el mantenimiento, renovación y modernización de las vías férreas, estaciones y demás instalaciones ferroviarias.
 - Asignación de Capacidad: Regula el acceso de los operadores a la red, asignando surcos horarios y garantizando condiciones equitativas para todos los actores del mercado.
 - Fomento de la Competencia: Impulsa la liberalización del sector ferroviario, facilitando la entrada de nuevos operadores y promoviendo la competencia en beneficio de los usuarios.
 - Innovación y Sostenibilidad: Desarrolla proyectos orientados a la modernización tecnológica y a la reducción del impacto ambiental del transporte ferroviario.

La liberalización del sector ferroviario en España, iniciada en 2005 para el transporte de mercancía y aún en proceso para el transporte de pasajeros, ha permitido la entrada de múltiples operadores que ofrecen servicios de transporte de pasajeros y mercancías en la red de ADIF. Entre los principales operadores se encuentran:

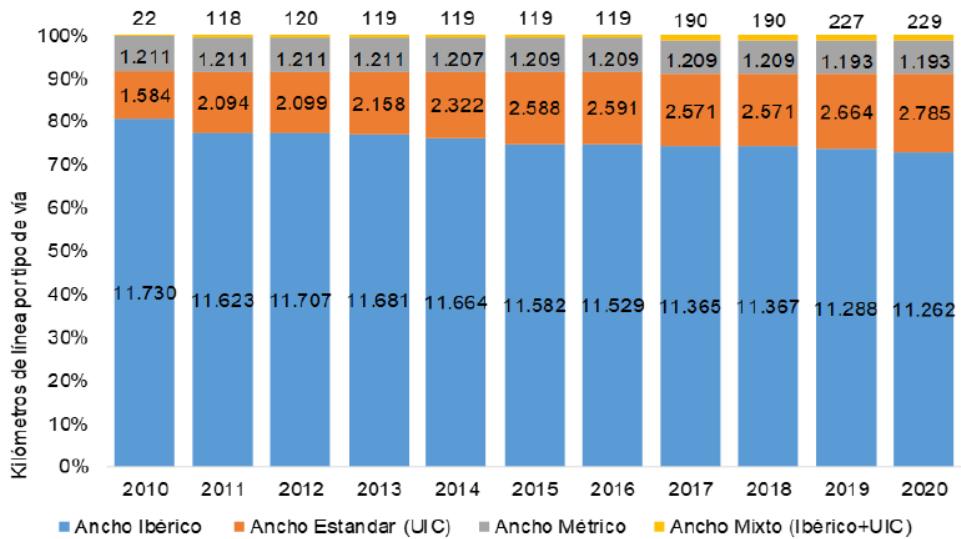
- Renfe: El operador histórico que continúa prestando servicios de transporte de pasajeros y mercancías en todo el territorio nacional.
- Ouigo España: Filial de la empresa francesa SNCF, que ofrece servicios de alta velocidad a precios competitivos en rutas como Madrid-Barcelona y en prácticamente las principales conexiones de toda la península.
- Iryo: Operador privado que ha iniciado operaciones en diversas rutas de alta velocidad, ampliando la oferta disponible para los usuarios.
- Otros operadores de mercancías: Diversas empresas privadas que gestionan el transporte de mercancías, contribuyendo a la diversificación y eficiencia del sector logístico ferroviario.

Según Táboas (2019), la competencia entre los operadores ha sido un factor clave en la mejora de las condiciones para los usuarios. Este entorno competitivo ha impulsado una reducción significativa de precios, lo cual ha permitido a los consumidores acceder a servicios de mayor calidad a costos más bajos. Además, la competencia ha generado una diversificación de la oferta, dando lugar a una mayor variedad de servicios y opciones personalizadas que se ajustan mejor a las necesidades y preferencias de los usuarios.

Este fenómeno también ha favorecido la innovación dentro del sector, ya que los operadores se ven obligados a mejorar continuamente sus propuestas, tanto en términos de calidad como de competitividad. La competencia, entonces, no solo beneficia a los usuarios en términos de costos, sino que también contribuye a la creación de un mercado más dinámico y flexible, donde los consumidores tienen un control más directo sobre sus elecciones. De esta manera, la competencia no solo reduce barreras económicas, sino que también impulsa un mercado más eficiente y centrado en las necesidades del usuario.

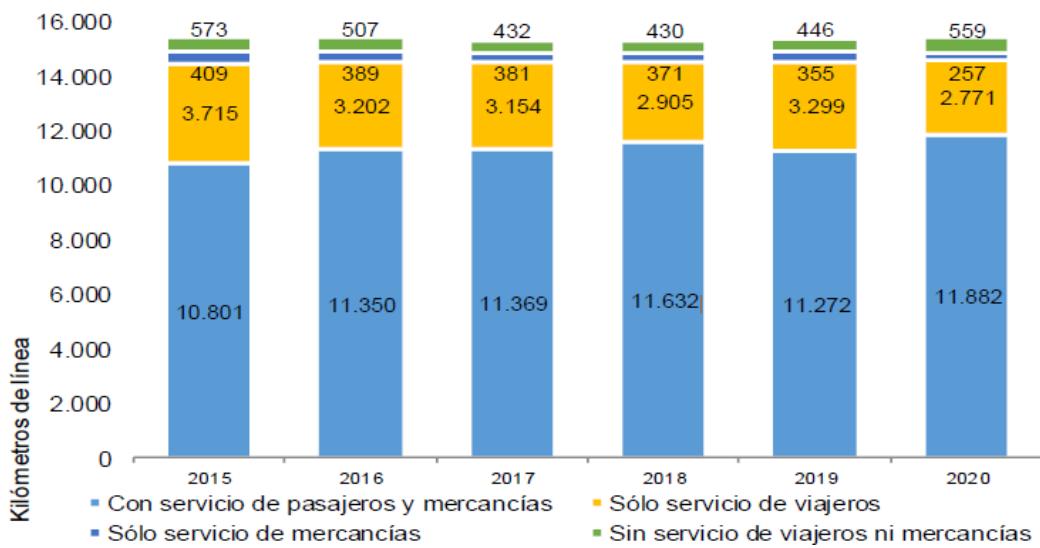
La red tiene más de 15.000 kilómetros de vías, pero una proporción bastante grande de estas vías aún presenta limitaciones. De esos 15,000 kilómetros, como podemos ver en la Figura 2, un 73% transita por vía única, restringiendo la capacidad de circulación de trenes en determinadas rutas. Además, un porcentaje de las vías no están electrificadas, esto impacta en la sostenibilidad del sistema y en su eficiencia energética. Solo un 12,5% de la red ferroviaria se corresponde con el ancho internacional UIC, lo que limita la interoperabilidad con otros países europeos y podría dificultar la expansión y conexión con otras redes internacionales.

Figura 2 - Anchos de vía. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021



En cuanto al transporte de mercancías y pasajeros, una gran parte del sistema ferroviario en España se basa en la coalición entre ambos. Aproximadamente el 77% de los trayectos ferroviarios se forma con el transporte combinado de mercancías y pasajeros, mientras que el porcentaje restante corresponde al transporte exclusivo de personas (ver Figura 3). Este modelo mixto intenta maximizar la eficiencia de la red y aprovechar mejor los recursos disponibles, sobre todo en rutas de largo recorrido.

Figura 3 - Distribución servicios transporte. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021



La infraestructura se extiende por todo el territorio español, conectando las principales ciudades y regiones, y desempeñando un papel crucial en la movilidad de pasajeros y mercancías.

2.2.2. Situación Renfe

Renfe es la principal empresa de transporte ferroviario en España, encargada de operar y gestionar la red de trenes de alta velocidad, media distancia y cercanías en todo el país. Fundada en 2005 como una entidad pública, Renfe ha jugado un papel fundamental en la movilidad de millones de personas, conectando ciudades y regiones de forma rápida, eficiente y sostenible.

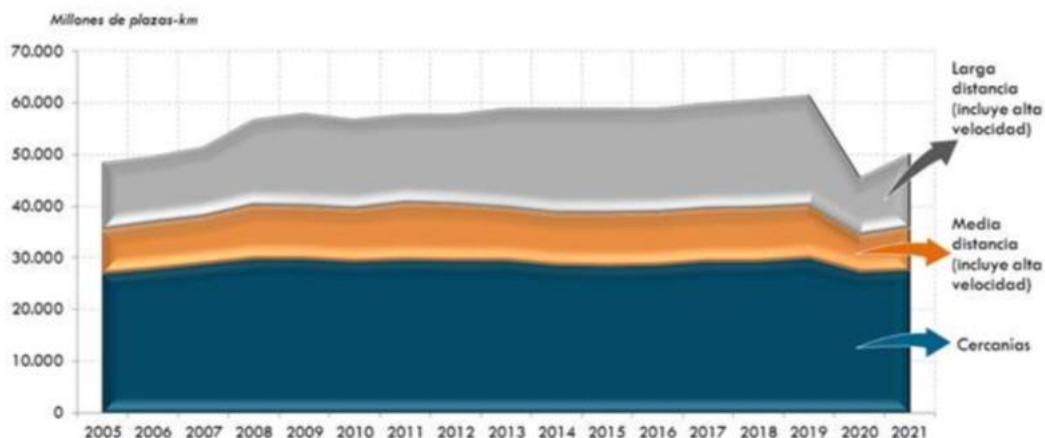
Como el operador ferroviario principal en España, se enfrenta al reto y la responsabilidad de gestionar un gran volumen de pasajeros a través de sus diversas divisiones de negocio. Estas incluyen no solo los servicios de alta velocidad más populares, sino también las líneas de media distancia, cercanías y los servicios internacionales.

El sector del transporte ferroviario de pasajeros ha tenido un crecimiento sostenido en las últimas décadas, y este impulso se debe a la expansión de la red de alta velocidad y a la constante modernización de las infraestructuras. De acuerdo con los datos más recientes (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021), Renfe ha logrado superar la cifra de los 500 millones de pasajeros anuales en todas sus áreas de servicio, con un crecimiento notable en los sectores de cercanías y alta velocidad, que son los más demandados por los usuarios. La apuesta por el transporte ferroviario, especialmente en la alta velocidad, ha permitido a la empresa conectar de manera eficiente grandes distancias lo que ha atraído a un público que optaba por otros medios de transporte como el avión o el automóvil.

La pandemia tuvo un impacto enorme, ya que la baja afluencia de pasajeros y las restricciones impuestas al transporte redujeron en gran cantidad la demanda. Sin embargo, tras la crisis sanitaria la recuperación fue rápida y la utilización de la red superó los niveles prepandemia en un 15% (ver Figura 4).

Este repunte se debe en parte a las restricciones aplicadas a otros medios de transporte, como los vuelos entre Madrid y Barcelona, que impulsaron el uso del AVE (Alta Velocidad Española) en esa ruta. Pero esta recuperación no fue en todas las líneas, ya que las rurales y de media distancia tuvieron una caída en el número de viajeros, reflejando un cambio en las prioridades de los usuarios hacia los servicios de alta velocidad.

Figura 4 - Evolución número de pasajeros: 2005-2021. Fuente: Informe 2022, Ministerio de Transporte



Uno de los aspectos más destacados son las líneas de alta velocidad, conocidas como AVE. Desde su lanzamiento, estas rutas han crecido mucho, posicionándose como una alternativa muy potente frente al transporte aéreo. El atractivo de las líneas AVE está en la reducción considerable de los tiempos de viaje entre las principales ciudades españolas, permitiendo a los usuarios optimizar su tiempo y afectar en menor medida al medio ambiente con una opción más sostenible en términos de emisiones. Ciudades como Madrid, Barcelona, Sevilla y Valencia se destacan como los principales puntos de conexión en esta red, con un flujo constante de pasajeros que se desplazan tanto por motivos laborales como turísticos.

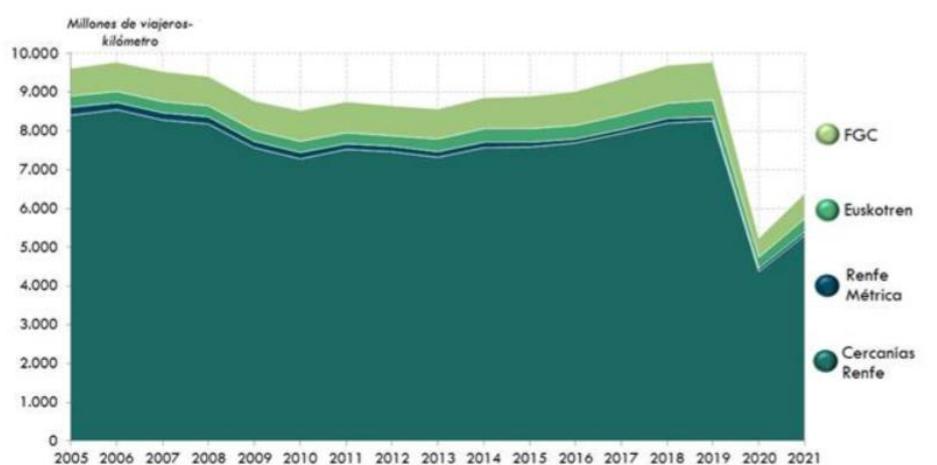
En particular, la ruta que conecta Madrid y Barcelona se ha consolidado como una de las más transitadas, transformándose en un corredor clave que impulsa el desarrollo económico y social entre estas dos grandes ciudades (CNMC, 2021).

Por otro lado, las líneas de media distancia de Renfe tienen un perfil de usuario distinto, ya que están diseñadas principalmente para conectar zonas rurales con ciudades de tamaño intermedio y grandes núcleos urbanos. Aunque este tipo de servicio no alcanza el volumen de pasajeros de las líneas de alta velocidad o las redes de cercanías, su papel sigue siendo fundamental para garantizar la conexión territorial en España, especialmente en aquellas regiones más despobladas. Gracias a estas líneas, los habitantes de áreas más alejadas pueden acceder fácilmente a ciudades cercanas para trabajar, estudiar o citas médicas importantes.

Algunas de las rutas más frecuentes en este segmento incluyen ciudades como Valladolid, Zaragoza y Málaga, que cuentan con un flujo constante de viajeros. Además, muchas de estas líneas de media distancia se conectan directamente con las redes de alta velocidad lo que permite a los usuarios realizar transbordos a destinos más lejanos.

Las redes de cercanías son las que concentran la mayor parte de los pasajeros en el sistema ferroviario de Renfe, especialmente en grandes ciudades como Madrid y Barcelona. Estas líneas facilitan el transporte diario de millones de personas y son cruciales para la movilidad con sus alrededores. De hecho, las cercanías representan más del 90% de los usuarios anuales de Renfe, un porcentaje muy elevado que nos marca su importancia (ver Figura 5).

Figura 5 - Evolución pasajeros Cercanías: 2005-2021. Fuente: Informe 2022, Ministerio de Transporte



En Madrid, el sistema de Cercanías transporta cerca de 250 millones de pasajeros al año, con las líneas C-5 y C-3 como las más utilizadas debido a su conexión con áreas residenciales y zonas de empleo.

En Barcelona, los Rodalies se consideran vitales para reducir la carga el tráfico y reducir las emisiones de carbono de los coches mejorando la calidad del aire en la ciudad.

En cuanto al transporte internacional, Renfe ha dado pasos importantes para expandir su presencia en otros mercados europeos, estableciendo acuerdos estratégicos y operaciones directas. Las líneas transfronterizas, como las que conectan España con Francia, están experimentando un incremento en el número de pasajeros, especialmente en rutas turísticas populares como la Barcelona-París.

Este crecimiento refleja el interés de Renfe en diversificar sus operaciones y captar nuevos segmentos de mercado. La compañía ha logrado posicionarse como una opción viable para los viajeros que buscan reducir su huella de carbono sin renunciar a la comodidad y la rapidez.

Renfe sigue siendo el principal operador ferroviario en España, tanto en el transporte de pasajeros como en el de mercancías, aunque la aparición de otros competidores parece provocar un replanteamiento en la gestión de los recursos de la compañía.

2.2.3. Liberalización del sector ferroviario: horizonte 2030

La liberalización del sector ferroviario en España ha sido un proceso progresivo orientado a fomentar la competencia, mejorar la eficiencia y ampliar la oferta de servicios para los usuarios. Este proceso ha implicado la apertura del mercado a nuevos operadores, la reestructuración de las empresas públicas existentes y la implementación de marcos regulatorios que faciliten una competencia equitativa.

El marco regulatorio del transporte ferroviario en España se enmarca en las directrices establecidas por la Unión Europea, que desde la década de 1990 ha promovido la apertura de los mercados ferroviarios nacionales para mejorar la eficiencia y la calidad del servicio. El primer esfuerzo europeo para homogeneizar la regulación fue la Directiva 91/440, que impuso la separación contable entre el gestor de infraestructuras y las compañías ferroviarias que las explotasen. Posteriormente, los Libros Blancos del Transporte de 1996 y 2001 presentados por la Comisión Europea inspiraron el primer Paquete Ferroviario, que se transponen al ordenamiento jurídico español mediante la ley 39/2003 del sector ferroviario (BOE, 18 de noviembre 2003) entrando en vigor en enero de 2005. Un hito significativo fue la separación de las funciones de gestión de infraestructuras y operación de servicios. En 2005, se creó ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) para encargarse de la gestión de las infraestructuras ferroviarias, mientras que Renfe Operadora asumió la prestación de los servicios de transporte de pasajeros y mercancías. Esta división buscaba garantizar un acceso no discriminatorio a la red ferroviaria para todos los operadores.

Entre 2004 y 2007 se sucedieron el Segundo Paquete Ferroviario para la liberalización del sector ferroviario de mercancías y Tercer Paquete Ferroviario para abrir la competencia del sector del transporte internacional de pasajeros. Dichos paquetes se transponen al ordenamiento jurídico español mediante la Ley 38/2015 del Sector Ferroviario (BOE, 29 de septiembre 215).

En 2016 la Unión Europea aprobó el Cuarto Paquete Ferroviario enfocado en la liberalización del transporte ferroviario nacional de pasajeros. La transposición a la legislación española se hizo mediante el Real Decreto-ley 23/2018 del Sector Ferroviario (BOE, 21 de diciembre 2018), que establece diciembre de 2020 como fecha de inicio para la entrada de nuevas empresas ferroviarias en el transporte de viajeros por ferrocarril en los servicios de larga distancia y alta velocidad, y la adjudicación directa y sin licitación a Renfe Operadora para la prestación de los servicios de media distancia y cercanías hasta 2027 (prorrogable hasta 2033).

Por tanto, la apertura del mercado de alta velocidad es la liberalización efectiva del transporte de pasajeros por ferrocarril en España. A diferencia de otros países europeos, España adoptó un modelo mixto de liberalización. Este enfoque combina *la competencia en el mercado*, donde múltiples empresas operan en régimen de libre competencia en una misma ruta, con elementos de *competencia por el mercado*, característicos de un régimen concesional. Este modelo ha sido pionero en Europa, logrando la coexistencia de tres operadores en un mismo corredor de alta velocidad (ADIF, 2024).

Según datos de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (ver Figura 6), la entrada de nuevos operadores en los corredores de alta velocidad ha llevado a un incremento del tráfico ferroviario y a una disminución significativa en los precios de los billetes. Por ejemplo, en el primer trimestre de 2023, se registró una reducción del 22% en los precios de los billetes en el corredor Madrid-Barcelona y del 23% en el corredor Madrid-Valencia, en comparación con el mismo período del año anterior (Informe CNMC, 2023).

Figura 6 – Distribución Precios por Operadoras trayecto MAD-BCN Fuente: CNMC



2.2.4. Alta velocidad y conectividad nacional

El sistema de alta velocidad en España, con una red de 3,402 kilómetros en operación, se ha convertido en uno de los pilares más importantes de la infraestructura ferroviaria del país. Estas líneas, diseñadas para operar a velocidades superiores a los 300 km/h, conectan algunas de las ciudades más relevantes del territorio español, como Madrid, Barcelona, Valencia y Sevilla, permitiendo una movilidad rápida entre grandes núcleos.

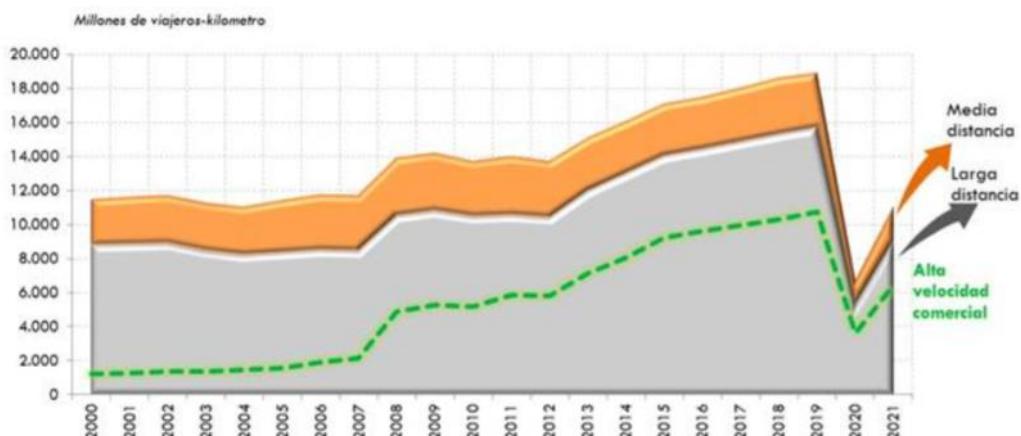
urbanos. La implementación de este sistema ha supuesto una auténtica revolución en la manera en que los españoles se desplazan, especialmente en distancias medias, donde el AVE se ha posicionado como una opción más competitiva. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

Uno de los puntos clave de la red de alta velocidad es la estación de Madrid Atocha, que actúa como el nodo central desde el cual se gestionan una gran parte de los trayectos. Esta estación conecta Madrid con el resto de las ciudades españolas y maneja un alto porcentaje del tráfico total de la red de alta velocidad, siendo un punto clave en el sistema ferroviario.

Además, el crecimiento de estas líneas ha estado fuertemente impulsado por las últimas restricciones medioambientales impuestas al transporte aéreo, especialmente en rutas de corta distancia, donde el AVE ofrece una opción más sostenible y eficiente en términos de tiempo y coste.

Al reducir los tiempos de viaje y ofrecer una experiencia más cómoda, las líneas de alta velocidad han ganado terreno en el transporte de pasajeros que anteriormente habrían optado por los vuelos nacionales aumentando su uso que se había visto reducido tras la pandemia (ver Figura 7).

Figura 7 - Evolución Media y Larga Distancia:2000-2021. Fuente: Informe 2022, Ministerio de Transporte



Sin embargo, el impacto del sistema de alta velocidad va más allá de la simple movilidad de personas. Estas conexiones facilitan el desarrollo económico regional al reducir los tiempos de desplazamiento entre los principales núcleos urbanos.

Según Fernández (2019), la mejora en la conectividad, impulsada en gran parte por la expansión y modernización de las infraestructuras de transporte, ha tenido un impacto significativo en la economía interregional, promoviendo un aumento en el comercio y en las relaciones comerciales entre diversas regiones. Esta mejora en la conectividad no solo ha facilitado el movimiento de bienes y servicios, sino que también ha abierto nuevas puertas para el desarrollo de sectores clave como el turismo, la industria y los servicios.

En el caso del turismo la conectividad mejorada ha permitido que más personas puedan acceder a destinos de manera más rápida y económica, lo que ha dado lugar a un aumento en la afluencia de turistas tanto nacionales como internacionales. Este crecimiento en el turismo ha generado nuevas oportunidades de negocio para las empresas locales, desde la hostelería hasta los servicios de transporte y ocio, beneficiando directamente a las economías regionales.

En el ámbito industrial, la mejora de la conectividad ha permitido a las empresas acceder más fácilmente a mercados lejanos, mejorar la distribución de sus productos y reducir costos logísticos. Esto ha favorecido la competitividad de las industrias regionales, que ahora pueden expandir su presencia y aumentar sus capacidades productivas en respuesta a una mayor demanda.

Además, el sector servicios ha experimentado un crecimiento paralelo, ya que la facilidad de conexión entre regiones ha favorecido el establecimiento de nuevas redes de colaboración, la externalización de servicios y la expansión de empresas que operan en diferentes territorios. En conjunto, estos sectores se han beneficiado del entorno más interconectado, lo que les ha permitido aprovechar nuevas oportunidades de crecimiento económico y fortalecer sus posiciones en el mercado (Fernández, 2019).

2.2.5. Cercanías y movilidad metropolitana

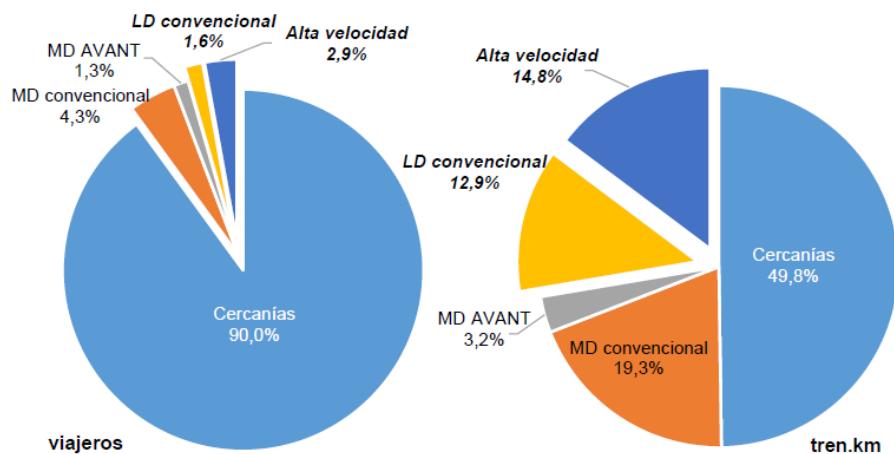
Renfe Cercanías es otro componente fundamental dentro del sistema de la empresa, proporciona movilidad diaria a millones de personas que se desplazan entre áreas urbanas y suburbanas. Especialmente en grandes áreas metropolitanas como Madrid, Barcelona y Valencia, estas líneas juegan un papel clave al conectar diferentes barrios, pueblos cercanos y centros urbanos.

Sobre una red que abarca más de 2,322 kilómetros, Renfe Cercanías es responsable de aproximadamente el 90% de los pasajeros anuales de Renfe (ver Figura 8). Gracias a su alta frecuencia y la facilidad de acceso, ayudan a la vida diaria de miles de trabajadores y estudiantes que dependen del tren como medio de transporte. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

Por otro lado, la red también consigue ofrecer conexiones entre ciudades más pequeñas y áreas rurales con grandes núcleos urbanos. Estas líneas son importantes para garantizar la accesibilidad al transporte en zonas menos pobladas como una alternativa a quienes viven lejos. Gracias a este servicio, las personas de comunidades más pequeñas pueden acceder a servicios esenciales en ciudades más grandes.

A pesar de su importancia, las líneas de cercanías tienen problemas en cuanto a las limitaciones de capacidad y la infraestructura envejecida. Aunque la demanda sigue siendo alta, estas redes a menudo no cuentan con la infraestructura moderna y la capacidad suficiente para ofrecer un servicio completamente de alta calidad. Las estaciones y los trenes requieren mejoras, y la saturación de algunas líneas en horas punta puede afectar la puntualidad y la comodidad de los viajeros. Además, la falta de electrificación en ciertas rutas y la necesidad de renovar las infraestructuras más antiguas son cuestiones que limitan la fiabilidad y la sostenibilidad del servicio pudiendo generar retrasos y parones. (Renfe, 2024)

Figura 8 – Porcentaje de utilización servicios por pasajeros y kilómetros de vía por servicio. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021



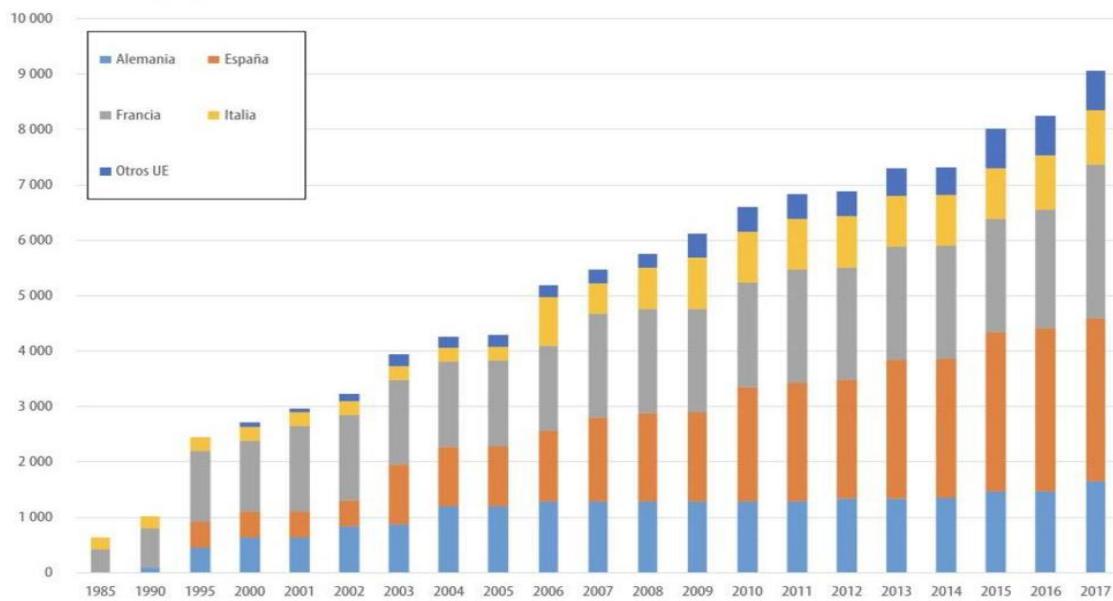
2.2.6. Internacionales Transporte de mercancías

Aunque se están realizando esfuerzos para mejorar la conectividad intermodal, siguen siendo insuficientes. Esto dificulta la transición entre modos de transporte como las personas que necesitan combinar el tren con un vuelo o un barco a menudo se encuentran con falta de instalaciones que permitan este cambio de manera rápida y sencilla. A pesar de que algunas estaciones importantes están comenzando a integrar más servicios, y que en la evolución temporal en los últimos años a nivel nacional ha mejorado significativamente (ver Figura 9), aún queda mucho por hacer para que el sistema ferroviario se convierta en intermodal (Informe Ferroviario Renfe, 2021).

Existen rutas que vinculan España con otros países europeos, principalmente a través de Francia y Portugal, pero la interoperabilidad sigue siendo un obstáculo importante. Las diferencias en el ancho de vía y los sistemas de señalización entre los países europeos complican la conexión del sistema ferroviario español con el resto de Europa. Estas diferencias técnicas exigen la adaptación de los trenes y las infraestructuras para poder circular sin problemas entre fronteras, esto genera retrasos, costes adicionales y complicaciones. (Rodríguez y Pérez, 2018)

Aunque se intentan resolver estos problemas y mejorar la conexión con el resto de Europa, la integración completa aún no se ha alcanzado y sigue siendo un desafío importante para el futuro del transporte ferroviario en España y en Europa. La implementación del sistema de señalización ERTMS (European Rail Traffic Management System) y la progresiva adaptación al ancho de vía estándar europeo son algunas de las medidas en marcha, pero su aplicación total requerirá una inversión considerable y una planificación a largo plazo (ADIF, 2024).

Figura 9 - Crecimiento redes de velocidad UE: 1985-2017. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021



2.2.7. Transporte de mercancías

La red de transporte de mercancías de ADIF en España, gestionada por Renfe Mercancías, abarca 1,527 kilómetros dedicados exclusivamente a este tipo de servicio. Esta red se centra en el transporte de bienes industriales, materias primas y productos perecederos. Opera a través de corredores logísticos como los del Mediterráneo y el Atlántico. Según datos recientes (ver Figura 10), el volumen total de mercancías transportadas por Renfe ha fluctuado en los últimos años, con una tendencia a la baja en ciertos períodos debido a la desaceleración económica y la falta de estrategias integradas para mejorar la eficiencia del servicio (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021; García, 2020).

En los últimos años, el tráfico de mercancías gestionado por Renfe ha enfrentado desafíos significativos en su evolución. Aunque el transporte ferroviario de mercancías ha sido una alternativa clave para reducir la congestión en carreteras y mejorar la sostenibilidad ambiental, su cuota de mercado sigue siendo reducida en comparación con otros países europeos (ver Figura 11). A pesar de los esfuerzos por modernizar la infraestructura y fomentar el uso del ferrocarril en el sector logístico, la competencia con el transporte por carretera y la falta de inversiones en terminales intermodales han limitado su crecimiento.

Figura 10 - Evolución tráfico de mercancías. Fuente: Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana

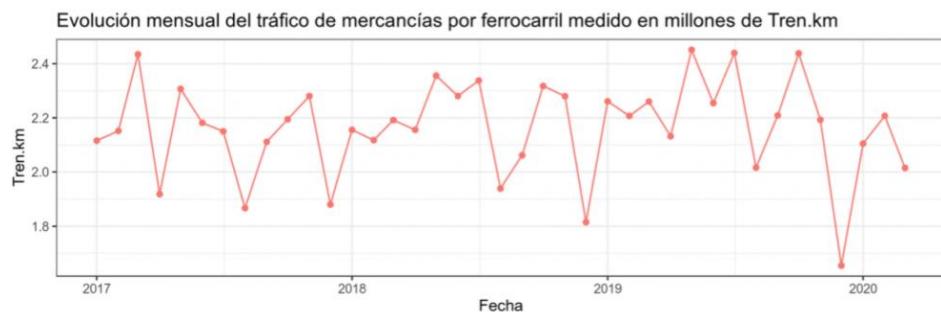
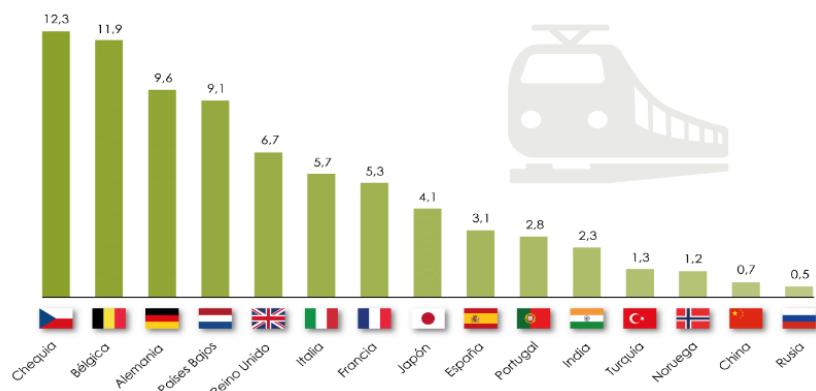


Figura 11 - Gráfico inversión infraestructuras ferroviarias por países. Fuente: El orden mundial EOM



El transporte ferroviario ofrece importantes ventajas medioambientales, como una menor huella de carbono en comparación con el transporte por carretera, pero uno de los problemas es la falta de terminales intermodales como ya mencionamos en el apartado anterior. Esta falta de infraestructura limita la capacidad de la red ferroviaria para competir de manera más eficiente con otros modos de transporte como la carretera, que sigue siendo la opción preferida para muchas empresas debido a su flexibilidad y la capacidad de llegar directamente a destinos con el servicio puerta a puerta.

2.2.8. Infraestructura de soporte

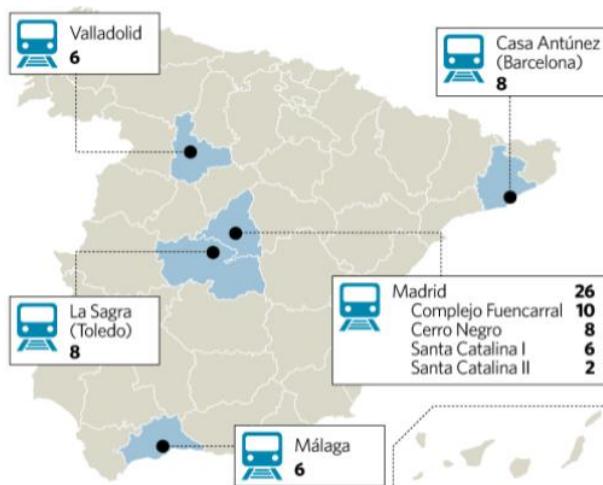
La operativa de Renfe se apoya en una red de talleres de mantenimiento distribuidos de a lo largo de todo el país. Estos talleres son importantes para el buen funcionamiento de la flota porque permiten realizar reparaciones y revisiones periódicas que aseguran que los trenes operen de manera segura. Además, las estaciones y terminales de carga actúan como puntos clave para la gestión de los pasajeros y de las mercancías (ver Figura 12).

Pero estos talleres, requieren modernizaciones para adaptarse a las exigencias del sistema en términos de eficiencia y tecnología. Muchas de estas instalaciones fueron construidas hace décadas y no siempre cumplen con los estándares actuales de

logística en el mundo empresarial. Para afrontar las crecientes demandas de pasajeros y mercancías, es necesario que estas infraestructuras se actualicen, incorporando nuevas tecnologías, mejorando la conectividad digital y optimizando los procesos logísticos. También, se podría realizar un análisis de las redes en las que se encuentran para poder gestionarlos de una forma más eficiente y reducir el número de costos, servicios y tiempos asociados. (Gómez, 2017)

Para seguir siendo una opción competitiva en el transporte tanto de pasajeros como de mercancías, Renfe necesita innovar y adaptarse continuamente, lo que implica una inversión constante en la modernización.

Figura 12 - Talleres Renfe. Fuente: Renfe



El sistema ferroviario español aún carece de una integración completa de herramientas digitales que permitan una planificación y gestión eficiente. La implementación de tecnologías como IoT y Big Data en la gestión operativa es limitada, lo que impide optimizar las rutas, prever fallos en las infraestructuras y mejorar la experiencia del usuario. García (2020)

2.3. Resumen estratégico Renfe

2.3.1. Contexto

La misión de Renfe es ofrecer servicios de transporte de viajeros y mercancías con seguridad, innovación y compromiso social, buscando aumentar la cuota del ferrocarril.

Su visión es ser el operador de referencia en calidad y eficiencia. Renfe se enfoca en liderazgo, excelencia empresarial, proximidad al cliente y compromiso con la calidad, la seguridad, la eficiencia energética y la innovación. (Renfe, 2024)

La liberalización del sector ferroviario europeo ha marcado un punto de inflexión para Renfe, que se enfrenta a un mercado abierto y competitivo. Este proceso, impulsado por la Unión Europea, busca fomentar la eficiencia, reducir costes y ofrecer mejores servicios a los usuarios.

Para Renfe, la entrada de nuevos operadores como SNCF (Francia) o ILSA (Italia) en rutas de alta velocidad supone un cambio en la estrategia de su operativa. Estas empresas introducen ofertas agresivas, precios competitivos y servicios personalizados que obligan a Renfe a revisar su estrategia. (Fernández, 2019)

La crisis económica y sanitaria derivada de la pandemia de COVID-19 ha añadido complejidad a este escenario. La caída en el volumen de pasajeros ha provocado una reducción en los ingresos de Renfe, especialmente en líneas de alta velocidad y larga distancia. Esto ha reflejado la necesidad de diversificar fuentes de ingresos y adaptar el modelo de negocio para evitar riesgos futuros.

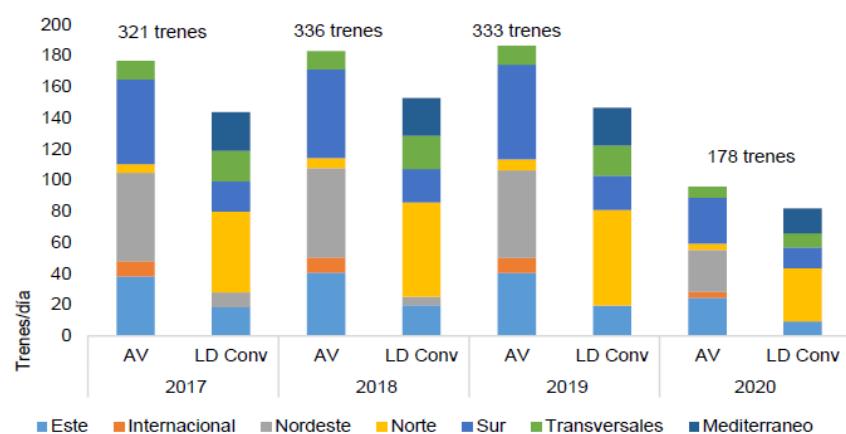
2.3.2. **Modelo de negocio actual**

El modelo de negocio de Renfe, estructurado según el marco Canvas, se organiza en nueve bloques fundamentales que permiten entender cómo la compañía gestiona su operativa, su relación con los clientes y sus recursos.

- **Segmentos de clientes:**

Renfe ofrece una variedad de servicios adaptados a diferentes tipos de usuarios (ver Figura 13). Por un lado, están los pasajeros de alta velocidad y larga distancia, que buscan rapidez, confort y la mejor experiencia de viaje. Este grupo valora las mejoras en la calidad del servicio, como asientos cómodos, wifi a bordo y tiempos de trayecto optimizados (Rodríguez & Pérez, 2018). Renfe también atiende a los viajeros de cercanías, que son más conscientes del precio y priorizan soluciones económicas para sus desplazamientos diarios. A esto se suman los clientes turísticos y corporativos, quienes demandan paquetes especiales, opciones de viajes más flexibles y servicios de calidad adaptados a sus necesidades particulares.

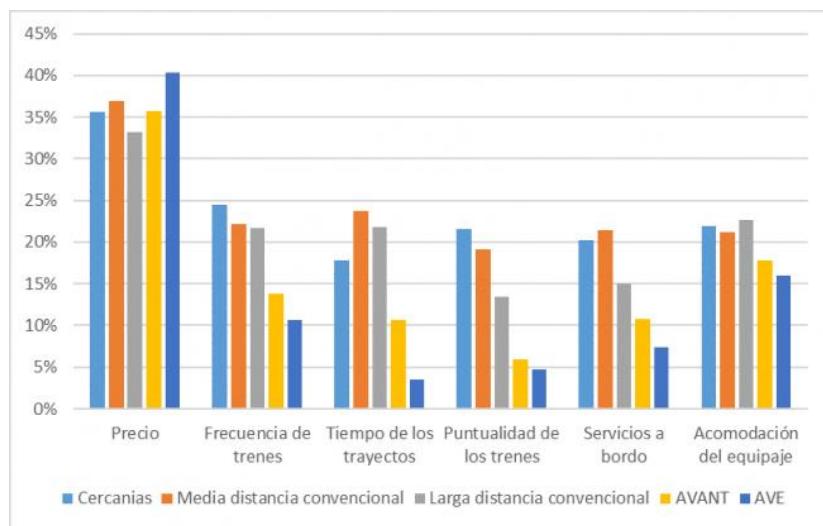
Figura 13 - Oferta de servicios por trenes. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021



- Propuesta de valor:

La propuesta de valor de Renfe se basa en tres pilares fundamentales: puntualidad, sostenibilidad y flexibilidad. La puntualidad es esencial para garantizar la confianza de los viajeros, mientras que la sostenibilidad se destaca por el compromiso de la compañía con el medio ambiente, utilizando energía eléctrica proveniente de fuentes renovables en muchas de sus líneas. La flexibilidad, por su parte, se refleja en las opciones de compra de billetes, los horarios adaptados a diferentes necesidades y la oferta de diversos servicios para que los usuarios puedan elegir la mejor opción según su disponibilidad y presupuesto (ver Figura 14).

Figura 14 - Gráfico interés clientes Renfe. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021



- Canales:

Renfe emplea tanto canales directos como indirectos para llegar a sus clientes. Entre los canales directos destacan la web, la aplicación móvil y las taquillas en las estaciones (ver Figura 15). Estos permiten a los usuarios realizar reservas, consultar horarios y obtener información en tiempo real de manera sencilla y rápida. Además, la digitalización ha facilitado que Renfe pueda ofrecer una experiencia personalizada a través de estos canales. En el ámbito indirecto, las agencias de viajes y las alianzas corporativas permiten que Renfe amplíe su alcance, ofreciendo sus servicios a un público más amplio que busca adquirir billetes a través de otros medios.

Figura 15 - Aplicación móvil Renfe. Fuente: Renfe

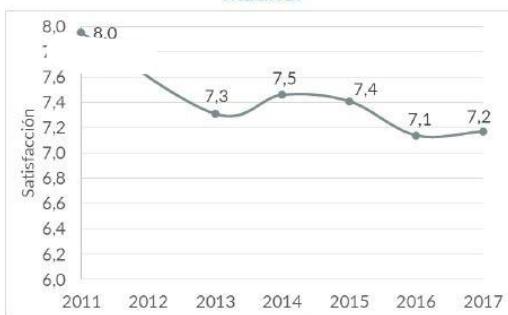


- Relación con los clientes:

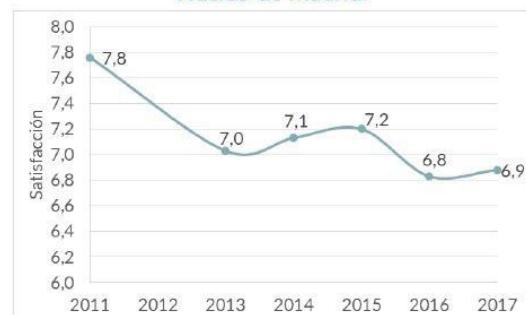
Renfe se enfoca en proporcionar una experiencia personalizada, basada en la satisfacción y la fidelización de sus usuarios. Para ello, utiliza plataformas digitales que permiten mejorar la comunicación, gestionar reclamaciones y ofrecer soporte al cliente de manera eficiente. Además, la compañía se esfuerza por mantener una relación constante con los pasajeros a través de notificaciones, promociones personalizadas y el seguimiento post-viaje, creando un vínculo que fomente la lealtad y el regreso de los usuarios manteniendo su satisfacción (ver Figura 16).

Figura 16 - Encuesta de satisfacción clientes. Fuente: Renfe

Satisfacción de los usuarios respecto a la puntualidad salidas/llegadas del tren. Núcleo de Madrid.



Satisfacción de los usuarios respecto a la regularidad (ausencia de incidencias en el servicio). Núcleo de Madrid.



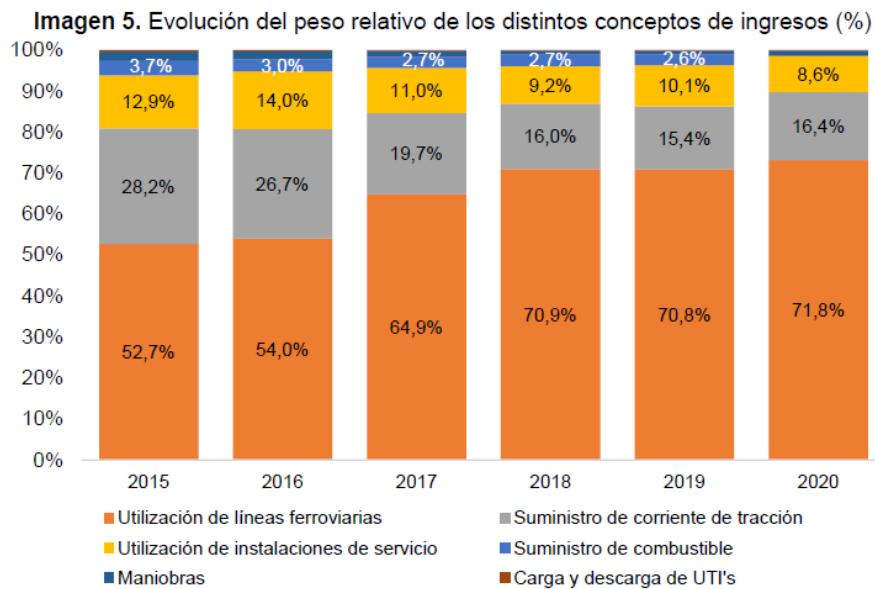
- Estructura de costes:

La estructura de costes de Renfe se basa principalmente en dos tipos de gastos: fijos y variables. Los costes fijos incluyen el mantenimiento de las infraestructuras y los trenes, que requieren inversiones constantes en renovación y mejora. Además, el consumo energético es un gasto importante, especialmente en líneas electrificadas, aunque la compañía se beneficia de un suministro eléctrico renovable que ayuda a mitigar su impacto ambiental. En cuanto a los costes variables, uno de los aspectos más

significativos es el combustible en las líneas no electrificadas, que sigue siendo un gasto importante en la operativa de ciertos servicios.

Este modelo de negocio permite a Renfe operar de manera eficiente, diversificando sus servicios para diferentes segmentos de clientes, mientras mantiene un fuerte compromiso con la sostenibilidad, la calidad y la mejora continua en la experiencia del usuario. Sin embargo, también enfrenta desafíos que requieren constantes ajustes en su estructura de costes y en la mejora de su infraestructura para seguir siendo competitiva en el mercado (ver Figura 17).

Figura 17 - Gráfico distribución de gastos. Fuente: Informe Ferroviario Renfe 2021



2.3.3. Análisis interno y externo

Entre sus principales fortalezas se destaca su amplia red de alta velocidad, que conecta de manera eficiente los principales núcleos urbanos de España brindándole una ventaja competitiva sobre otros modos de transporte, especialmente en trayectos de media y larga distancia. Además, Renfe tiene una sólida reputación como el operador nacional por excelencia, gracias a su larga trayectoria.

Renfe también enfrenta algunas debilidades que pueden limitar su capacidad para competir en un entorno cada vez más dinámico. Uno de los principales desafíos son sus altos costos operativos, que afectan la rentabilidad de la empresa y dificultan la sostenibilidad financiera a largo plazo. Además, la burocracia interna puede frenar la toma de decisiones y dificultar la implementación de cambios rápidos, lo que afecta a su capacidad de adaptación ante los cambios en la demanda o la regulación (Renfe, 2024).

Otra debilidad importante es su dependencia de las subvenciones públicas para financiar algunos proyectos estratégicos. Esto la hace vulnerable a las decisiones gubernamentales y a posibles recortes en los presupuestos destinados al sector

ferroviario, que puede afectar la capacidad de inversión de Renfe en innovación y expansión.

Desde el punto de vista externo, el análisis PESTEL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico y Legal) destaca varias oportunidades y amenazas para Renfe. Entre las oportunidades, la internacionalización es una de las más relevantes. Renfe ha comenzado a expandirse en mercados internacionales, con proyectos destacados como la línea de alta velocidad Haramain en Arabia Saudí y su participación en la construcción de la línea de alta velocidad en Texas, Estados Unidos (García, 2020).

Estos proyectos no solo abren nuevos mercados para Renfe, sino que también le permiten diversificar sus fuentes de ingresos y aprovechar su experiencia en el sector ferroviario. Además, la creciente demanda de transporte sostenible ofrece una oportunidad significativa para Renfe para poder mantener su operativa en el futuro.

Existen amenazas que podrían dificultar el desarrollo como las regulaciones ambientales más estrictas que podrían imponer costos adicionales y restricciones operativas la necesidad de adaptarse rápidamente podría aumentar los costos de operación. Otra amenaza es la competencia con otros modos de transporte, donde el tren de alta velocidad podría perder parte de su atractivo (García, 2020).

Por último, la dependencia de las decisiones de ADIF respecto a la infraestructura ferroviaria es otra amenaza importante. El gestor de la infraestructura ferroviaria en España tiene un control enorme sobre las condiciones en las que Renfe opera. Si no se realizan las inversiones necesarias en infraestructura o si se experimentan retrasos en el desarrollo de nuevas líneas, Renfe podría enfrentar dificultades para mantener su competitividad.

2.3.4. Estrategias propuestas y proyecciones futuras

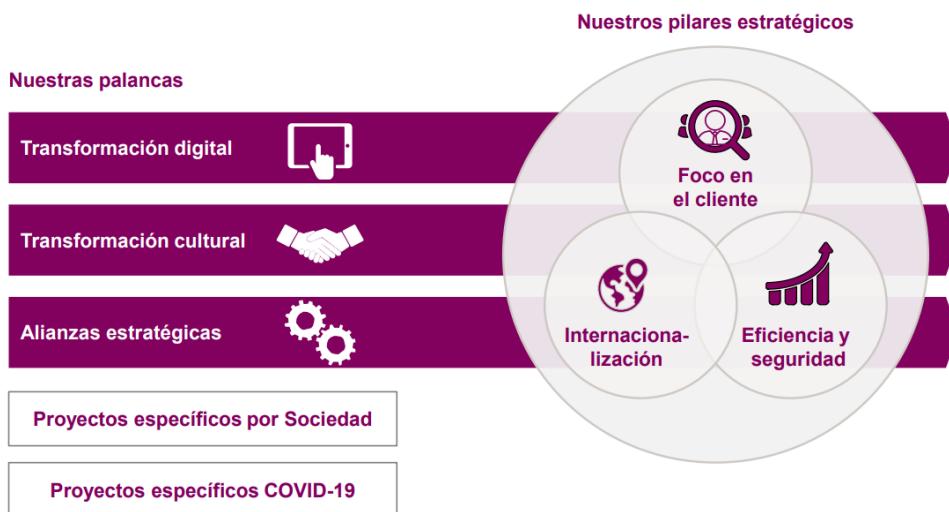
Renfe tiene como objetivo convertirse en una compañía integral de movilidad, aprovechando su experiencia para liderar proyectos internacionales y desarrollar plataformas digitales que unifiquen diversos modos de transporte. A través de inversiones estratégicas y una apuesta decidida por la sostenibilidad, busca consolidarse como un referente en el transporte ferroviario europeo e internacional.

Renfe ha trazado un ambicioso Plan Estratégico con horizonte en 2028, cuyo principal objetivo es transformar la compañía para posicionarse como líder en movilidad y servicios logísticos, a través de la innovación, la internacionalización y una fuerte orientación hacia el cliente. Este plan refleja el compromiso de Renfe con la mejora continua y su adaptación a un entorno que está experimentando rápidos cambios tecnológicos, económicos y sociales (ver Figura 18).

Un aspecto clave del plan es el proceso de digitalización en el que está inmersa Renfe, siendo una de sus palancas. La compañía busca convertirse en un referente en movilidad, no solo en España, sino también en Europa, utilizando tecnologías avanzadas para optimizar sus operaciones. Esto incluye la implementación de herramientas de Big Data, IoT e inteligencia artificial, con el fin de hacer más eficientes tanto la gestión de rutas y horarios, como la experiencia del usuario. A través de estas tecnologías, Renfe pretende mejorar la puntualidad, reducir el impacto ambiental y

ofrecer un servicio más personalizado, que responda a las necesidades cambiantes de los pasajeros (Gómez, 2017).

Figura 18 - Grafismo plan estratégico Renfe. Fuente: Plan estratégico Rente



Dentro de este proceso de transformación, Renfe también ha identificado la necesidad de fortalecer sus servicios de Cercanías, Rodalies y Media Distancia. Con la incorporación de 406 nuevos trenes de última generación, la compañía planea contar con una de las flotas más modernas de Europa, lo que no solo mejorará la capacidad operativa, sino también la experiencia del pasajero. Esta renovación de flota responde a la creciente demanda de estos servicios y al contexto de liberalización del mercado de Cercanías y Media Distancia, prevista antes de 2033. Con estos nuevos trenes y un sistema más eficiente, Renfe se prepara para seguir siendo el operador de referencia en estos segmentos, asegurando que sus servicios sean competitivos en un mercado cada vez más dinámico.

En cuanto a su liderazgo en alta velocidad, Renfe planea seguir adaptándose a las nuevas demandas de movilidad y a un entorno competitivo en constante evolución. El AVE y otras líneas de alta velocidad son un pilar fundamental de su modelo de negocio, y la empresa se compromete a mejorar la calidad y frecuencia de estos servicios, garantizando que sigan siendo una alternativa atractiva frente a otros modos de transporte. La compañía está especialmente enfocada en seguir mejorando la experiencia de sus pasajeros, al tiempo que refuerza su posición en este mercado competitivo (Rodríguez & Pérez, 2018).

La expansión internacional también juega un papel crucial en la estrategia de Renfe. La empresa ha establecido alianzas estratégicas, como su colaboración con Leo Express, con el objetivo de explorar oportunidades en mercados europeos clave, como Alemania y Francia. Estas alianzas buscan aprovechar la experiencia de Renfe en el sector ferroviario para entrar en nuevos mercados y seguir diversificando sus fuentes de ingresos. Además, Renfe participa activamente en proyectos internacionales destacados, como la línea de alta velocidad Haramain en Arabia Saudí, lo que refuerza su presencia global y le permite acceder a nuevas oportunidades de negocio en mercados internacionales en crecimiento (Gómez, 2017).

El Plan Estratégico de Renfe hasta 2028 tiene como objetivo hacer de la empresa un actor clave en la transformación del sector ferroviario, tanto a nivel nacional como internacional. A través de la digitalización, la modernización de infraestructuras, la expansión internacional y un firme compromiso con la sostenibilidad, Renfe se prepara para afrontar los desafíos del futuro y consolidarse como un referente en el ámbito de la movilidad y los servicios logísticos.

3. Fundamentos para el análisis de redes

3.1. Introducción

La teoría de grafos (también llamada teoría de redes) es una rama de las matemáticas que estudia las propiedades de las redes con aplicaciones en múltiples disciplinas (como las ciencias de la computación y las telecomunicaciones, el análisis de redes sociales, la optimización de recorridos, flujos y procesos, redes eléctricas, química orgánica, etc.) debido a su capacidad para modelar sistemas complejos a través de nodos y conexiones.

En el caso del transporte ferroviario, su aplicación permite evaluar la conectividad, eficiencia y resiliencia de la red, identificando patrones de movilidad y determinando la importancia de estaciones y corredores estratégicos. También permite entender mejor la distribución del tráfico de pasajeros, la redundancia de rutas y la identificación de estaciones clave en términos de flujo de viajeros. La red ferroviaria española, gestionada en gran medida por ADIF y operada por varias compañías siendo Renfe el principal operador, es un sistema interconectado con distintos niveles de infraestructura y servicios, desde Cercanías hasta Alta Velocidad. Utilizar la teoría de redes para analizar su estructura facilita la toma de decisiones en planificación y optimización. Varios trabajos han combinado datos de la operación del transporte ferroviario con las propiedades de la red para comprender mejor la robustez de las redes (Cats y Jenelius, 2014; Cats y Jenelius, 2015; Kim *et al.*, 2015; Rodriguez-Núñez y García-Palomares, 2014; Wang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017). El enfoque metodológico basado en redes se ha aplicado en otros ámbitos del transporte, como el análisis de redes aeroportuarias. Delgado (2014) estudió la estructura de los aeropuertos europeos mediante métricas como la densidad, la centralidad y el clustering.

La aplicación de la teoría de redes al ferrocarril en España sigue una línea similar a la empleada en la aviación, proporcionando herramientas para evaluar la robustez del sistema y su adaptabilidad a cambios en la movilidad. Centrando la atención en el transporte de pasajeros en cercanías Madrid, los datos sobre la distribución de pasajeros, las conexiones intermodales y la estructura de la red de ADIF permiten realizar un estudio detallado de la accesibilidad de los nodos, la eficiencia en términos de tiempos de viaje y la capacidad de absorción de demanda en estaciones principales.

3.2. Redes: Propiedades

Según Jackson (2008) y Newman (2010), el estudio de redes se basa en la caracterización matemática de su estructura mediante métricas que cuantifican la conectividad y la eficiencia del sistema.

Antes de abordar las características de las redes, es fundamental aclarar ciertos términos clave: red dirigida/ no dirigida, camino, walk, ciclo y loops, utilizando como ejemplo una red sencilla (ver Figura 19). En el análisis de la red ferroviaria de Cercanías

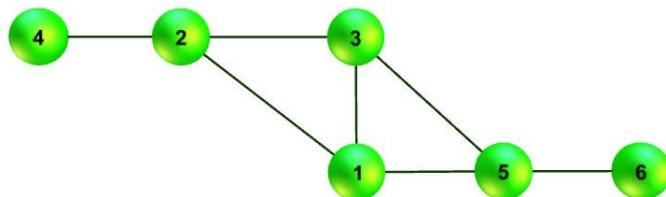
Madrid estamos ante una red no dirigida sin loops, donde los nodos son las estaciones y los enlaces representan trayectos ferroviarios bidireccionales entre estaciones.

- Una red puede clasificarse como dirigida o no dirigida dependiendo de si los enlaces tienen un sentido específico o no.
- Un camino es la secuencia de estaciones y conexiones ferroviarias necesarias para desplazarse de un punto a otro sin repetir nodos intermedios. En el ejemplo, el camino de nodo-4 a nodo-5 sería: {4, 2, 3, 1, 5}.
- Un walk es una secuencia de estaciones en la que se pueden recorrer los mismos nodos varias veces, algo relevante en el contexto ferroviario cuando existen recorridos alternativos para un mismo trayecto. En otras palabras, un walk es un camino en el que se permite pasar por los mismos nodos en varias ocasiones. En el ejemplo, el walk de nodo-4 a nodo-5 sería: {4, 2, 3, 1, 3, 5}.
- Un ciclo es un walk en el que la estación de origen y destino coinciden sin repetir otros nodos más de una vez. En el ejemplo, existen tres posibles ciclos con diferentes combinaciones de origen y destino: {2, 3, 1}, {1, 3, 5} y {2, 3, 5, 1}.
- Un loop es un enlace en los que el nodo de origen y destino es el mismo.

La eficiencia de la red también se puede evaluar mediante el cálculo de la longitud media de los caminos, que representa el número promedio de enlaces necesarios para conectar dos estaciones cualesquiera. Redes con una baja longitud media de caminos suelen ser más eficientes, ya que reducen los tiempos de viaje y mejoran la accesibilidad.

Estos análisis permiten evaluar la resiliencia de la red ante fallos o interrupciones en el servicio. Estaciones con alta centralidad de intermediación pueden representar puntos críticos cuya interrupción afectaría significativamente la operatividad del sistema. Además, la redundancia de conexiones en determinadas zonas puede mejorar la capacidad de la red para absorber disruptiones y mantener la movilidad de los pasajeros. La aplicación de estos conceptos ha sido ampliamente utilizada en el análisis de infraestructuras de transporte, incluyendo redes ferroviarias y aeroportuarias.

Figura 19 - Ejemplo sencillo de red no dirigida



Fuente: Delgado (2014)

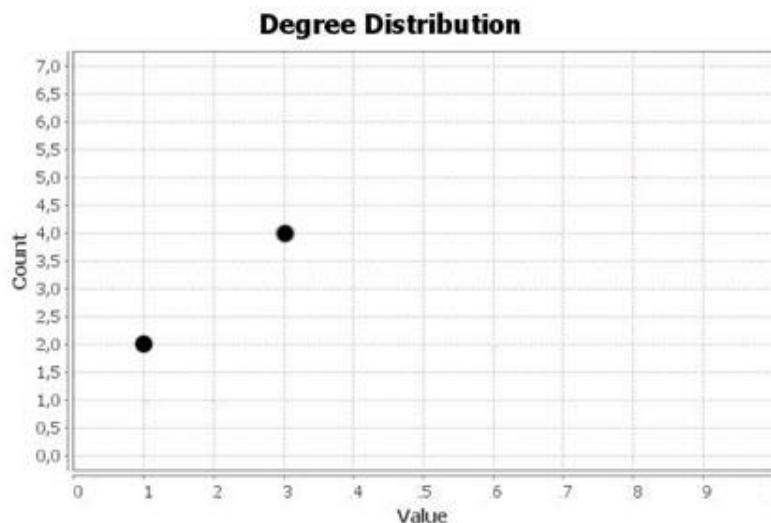
3.2.1. Grado

El grado es una de las propiedades más importantes en el análisis de redes, ya que permite evaluar el nivel de conectividad de cada nodo y su influencia dentro del sistema.

Esta medida es fundamental para comprender la estructura general de una red y su comportamiento en distintos contextos.

- Grado de un nodo: Se define como la cantidad de enlaces que posee un nodo con otros dentro de la red. En redes no dirigidas, como el caso de la red ferroviaria, el grado de un nodo se determina por la cantidad total de conexiones sin diferenciar su dirección.
- Grado máximo de la red: Se refiere al nodo con el mayor número de conexiones dentro del sistema. Identificar este nodo es clave para reconocer los puntos de mayor centralidad dentro de la red, los cuales suelen desempeñar funciones críticas en la transmisión de información o en la movilidad dentro de sistemas de transporte.
- Grado medio de la red: Se calcula como el promedio del grado de todos los nodos que forman parte de la red. Este valor es útil para medir la densidad de conexiones en el sistema y comparar la conectividad de distintas redes. Una red con un grado medio alto tiende a ser más interconectada, mientras que una con grado medio bajo puede presentar dificultades en la transmisión de información o en la movilidad de elementos a través de la estructura.
- Distribución de grado: Describe la variabilidad en la cantidad de conexiones que tienen los nodos dentro de una red. Este análisis permite identificar si una red tiene una estructura homogénea, en la que la mayoría de los nodos presentan un grado similar, o una estructura heterogénea, donde algunos nodos poseen una cantidad de enlaces significativamente mayor que el resto. En redes de infraestructura o transporte, una distribución de grado concentrada en unos pocos nodos centrales puede implicar vulnerabilidades en caso de fallos en esos puntos clave. En la Figura 20 se muestra un ejemplo donde los nodos se distribuyen únicamente en dos grupos lo que indica un grado de homogeneidad.

Figura 20 - Ejemplo de distribución de grado en la red. Fuente: Delgado (2014)



Según Newman (2003), la asortatividad es un parámetro que mide la afinidad de los nodos para conectarse con otros que posean un grado similar. En una red asortativa, los nodos con alto grado tienden a estar conectados entre sí, formando comunidades

con una fuerte interdependencia. Por el contrario, en redes disortativas, los nodos con un alto grado suelen enlazarse con nodos de menor conectividad, generando estructuras jerárquicas con una distribución desigual de enlaces. Este aspecto es crucial para el análisis de redes de transporte o comunicación, ya que influye en su resistencia a fallos y su capacidad de adaptación a cambios en la demanda o en la estructura de las conexiones.

3.2.2. Densidad

La densidad es un indicador clave para evaluar la interconexión dentro de una red, ya que mide en qué medida los nodos están conectados entre sí en comparación con la cantidad máxima de enlaces posibles. Su valor varía entre 0 y 1, donde 0 representa una red completamente fragmentada sin conexiones entre los nodos, y 1 indica una red en la que todos los nodos están conectados con todos los demás.

El cálculo de la densidad se basa en la relación entre los enlaces presentes y la cantidad máxima de conexiones posibles dentro del sistema. En redes no dirigidas sin loops, esta métrica se obtiene mediante la siguiente expresión matemática [1]:

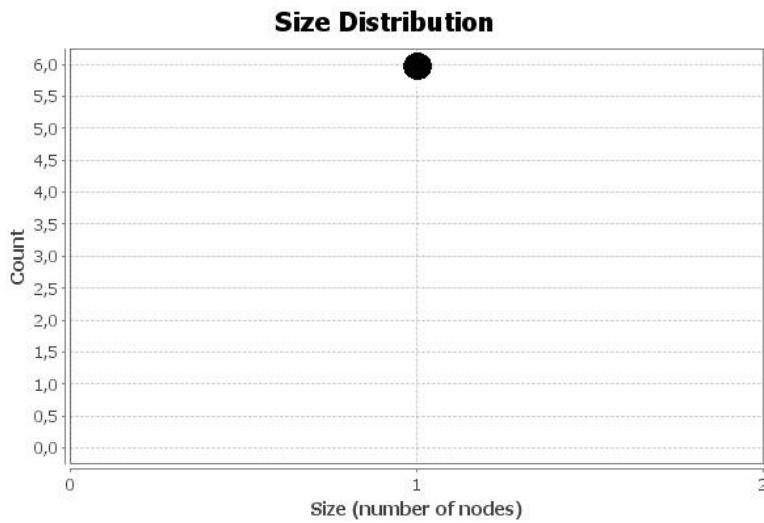
$$D = \frac{E}{N(N-1)/2}, \quad [1]$$

donde D representa la densidad, E es el número de enlaces en la red y N es la cantidad de nodos. Si se tratara de una red dirigida, la densidad resultante sería menor debido a que los enlaces tendrían un único sentido, reduciendo así el número máximo posible de conexiones.

Cuando dentro de una red todos los nodos están interconectados de manera directa o indirecta mediante caminos existentes, se dice que la red es conexa. Esto implica que desde cualquier nodo es posible acceder a cualquier otro dentro del mismo sistema, sin que existan subgrupos aislados. Sin embargo, una red conexa no implica necesariamente que todos los nodos tengan conexión directa entre sí.

El caso extremo de conectividad ocurre cuando todos los nodos presentan enlaces directos con el resto, formando una red completamente conexa o completa (ver Figura 21). En este tipo de estructura, cualquier nodo puede alcanzar cualquier otro sin la necesidad de transitar por nodos intermedios. Sin embargo, en la mayoría de las redes reales, esto no ocurre, ya que la eficiencia en términos de recursos y mantenimiento requiere estructuras con niveles de conexión optimizados, evitando enlaces redundantes que no aportan mejoras significativas en la funcionalidad del sistema.

Figura 21 - Ejemplo de distribución de componentes conexas en la red. Fuente: Delgado (2014)



3.2.3. Paso medio

La longitud del camino medio es un indicador importante de la conectividad y eficiencia de una red. Esta métrica refleja la facilidad con la que los nodos de la red pueden comunicarse entre sí, tomando en cuenta la cantidad promedio de enlaces necesarios para conectar cualquier par de nodos a través de sus caminos más cortos. La longitud del camino medio se obtiene mediante el cálculo del promedio de las distancias geodésicas de todos los posibles pares de nodos de la red.

La distancia geodésica, también conocida como distancia más corta entre dos nodos, es el camino con el menor número de enlaces posibles que conecta a dichos nodos. Define el recorrido más eficiente para transmitir información, bienes o servicios entre dos puntos de la red. Si dos nodos no están conectados de ninguna manera, la distancia geodésica entre ellos se considera infinita, lo que implica que no existe ningún camino directo ni indirecto entre dichos puntos dentro de la estructura de la red (Delgado, 2014).

El cálculo de la longitud del camino medio requiere un análisis complejo de todos los pares de nodos de la red. Para cada par de nodos, se identifica su distancia geodésica, es decir, el número de enlaces que deben recorrerse para llegar de uno a otro por la vía más corta. Posteriormente, se suman todas estas distancias geodésicas y se divide el resultado entre el número total de pares posibles, obteniendo así un promedio que representa la longitud media de los caminos dentro de la red. Este valor proporciona una medida cuantitativa de la accesibilidad y eficiencia general del sistema.

En el ejemplo que se presenta, se calcula la longitud media del camino para una red específica (ver Figura 19). En este caso, la longitud del camino medio es 1,8, obtenida a partir de la suma de los valores de la matriz triangular superior de distancias entre los nodos, dividida por el número total de elementos considerados en el cálculo.

Este valor refleja que, en promedio, para cada par de nodos, se deben recorrer 1,8 enlaces para llegar del uno al otro por el camino más corto. Este tipo de medida es crucial, ya que no solo ayuda a evaluar la eficiencia de la red en términos de conectividad, sino que también ofrece información sobre su robustez y rendimiento, lo

cual es esencial para la planificación y optimización de infraestructuras en redes complejas.

3.2.4. Diámetro y Excentricidad

La excentricidad es una métrica que permite evaluar el grado de aislamiento o accesibilidad de cada nodo dentro de una red. Se define como la mayor distancia geodésica que existe entre un nodo y cualquier otro dentro del sistema. En términos estructurales, los nodos con una excentricidad alta se encuentran en posiciones periféricas dentro de la red, mientras que aquellos con valores más bajos están situados en zonas centrales con mayor accesibilidad a distintos puntos.

El análisis de la excentricidad permite identificar patrones dentro de una red, ya que su distribución refleja qué tan equilibrada está la conectividad en el sistema. Una distribución uniforme de la excentricidad indicaría una red homogénea donde la mayoría de los nodos tienen accesos equitativos al resto, mientras que una distribución desigual señalaría la presencia de nodos clave con una función central en la conectividad global.

Existen dos medidas derivadas de la excentricidad que ayudan a describir la estructura general de la red: el diámetro y el radio. El diámetro de una red se define como el mayor valor de excentricidad registrado dentro del sistema, es decir, la distancia más larga entre dos nodos. Esta medida es útil para evaluar la eficiencia en la propagación de información o movilidad dentro de la red. Por otro lado, el radio de la red corresponde al menor valor de excentricidad encontrado, lo que indica la mejor accesibilidad posible dentro del sistema. Una red con un radio bajo sugiere la existencia de nodos estratégicos con una conectividad elevada, mientras que un diámetro alto puede señalar problemas de conectividad en zonas más alejadas (Delgado, 2014).

El estudio de la excentricidad y su distribución en la red resulta fundamental para determinar la eficiencia de los recorridos y la estructura jerárquica del sistema. Redes con una gran disparidad entre su diámetro y su radio pueden presentar problemas de accesibilidad, mientras que redes con valores más equilibrados tienden a ofrecer una conectividad más eficiente y estable.

Distribución de excentricidad de la red: Se define como descripción de las frecuencias relativas de los nodos que tienen excentricidades distintas, que resulta una distribución. La distribución de excentricidad de la red de la Figura 19 muestra que hay 2 nodos con excentricidad 2 (centrales), hay 2 nodos con excentricidad 3 y 2 nodos con excentricidad 4 (periféricos) (ver Figura 22).

El diámetro de una red: Se define como la máxima excentricidad de una red. En la red de la Figura 19, la máxima excentricidad es 4 y corresponde a los nodos periféricos 4 y 6 (ver Tabla 1).

El radio de una red: Se define como la mínima excentricidad de una red. En la red de la Figura 19, la mínima excentricidad es 2 y corresponde a los nodos centrales 1 y 3 (ver Tabla 1).

Figura 22 - Ejemplo excentricidad de la red. Fuente: Delgado (2014)

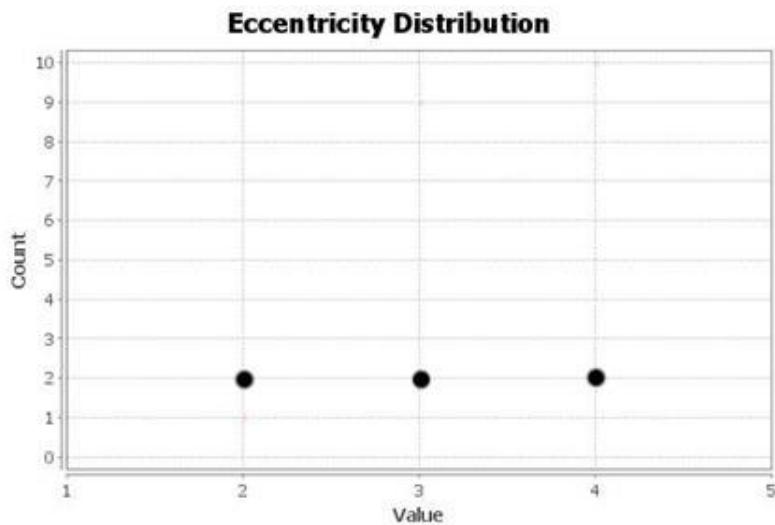


Tabla 1 - Propiedades de conectividad la red. Fuente: Delgado (2014)

Nodo	Grado	Distancia al Nodo2	Distancia al Nodo2	Distancia al Nodo3	Distancia al Nodo4	Distancia al Nodo5	Distancia al Nodo6	Excentricidad
1	3	-	1	1	2	1	2	2
2	3	1	-	1	1	2	3	3
3	3	1	1	-	2	1	2	2
4	1	2	1	2	-	3	4	4
5	3	1	2	1	3	-	1	3
6	1	2	3	2	4	1	-	4

3.2.5. Clustering

El clustering es un parámetro que evalúa la tendencia de los nodos a formar grupos altamente conectados dentro de una red. Según Jackson (2008), esta propiedad mide la probabilidad de que dos nodos que están conectados a un mismo nodo también estén conectados entre sí. Es una medida clave para analizar la cohesión dentro del sistema.

El coeficiente de clustering de un nodo se obtiene al dividir la cantidad de enlaces existentes entre sus vecinos por el total de enlaces posibles entre ellos. En la Figura 19 se muestra una red en la que el nodo 1 tiene tres vecinos (nodos 2, 3 y 5). Si hay dos enlaces entre ellos, el coeficiente de clustering de este nodo es 0.67. La Tabla 2 recoge los valores de clustering de cada nodo en la red.

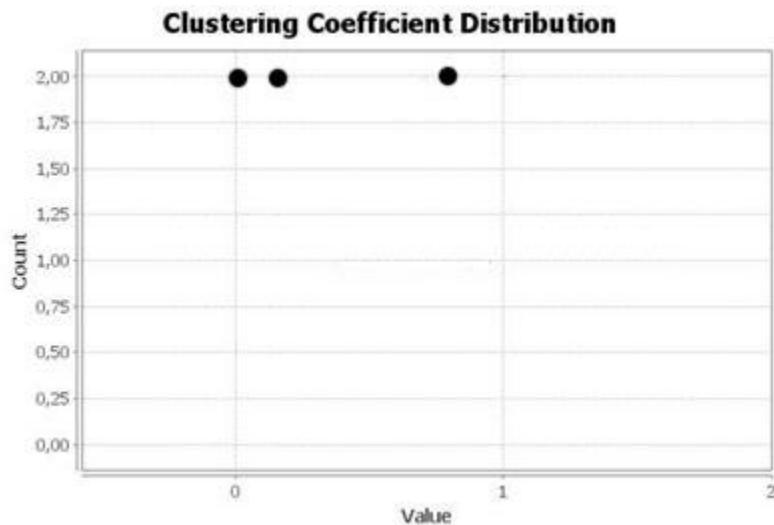
Tabla 2 - Clustering de la red. Fuente: Delgado (2014)

Nodo	grado	Enlaces entre vecinos	Clustering
1	3	2	0.67
2	3	1	0.34
3	3	2	0.67
4	1	0	0
5	3	1	0.34
6	1	0	0

El coeficiente medio de clustering de la red se obtiene promediando los coeficientes de clustering de todos los nodos del sistema. En la red de la Figura 19, este valor es 0.34, resultado de la suma ponderada de los coeficientes individuales dividida por el número total de nodos.

La distribución del clustering permite analizar cómo se agrupan los nodos dentro del sistema. La distribución del clustering en la red de la Figura 19 muestra que hay nodos con coeficientes altos, representando áreas más densamente conectadas, y nodos con coeficientes bajos o nulos, que se encuentran en zonas periféricas con menor interacción local (ver Figura 23).

Figura 23 - Ejemplo de distribución de clustering en la red. Fuente: Delgado (2014)



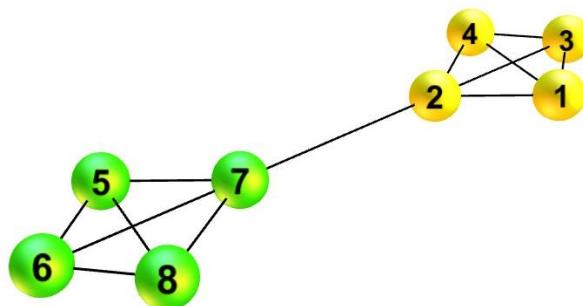
Coeficiente medio clustering de red: resulta de dividir la suma de todos los coeficientes de clustering de cada uno de los nodos de la red por el número total de nodos. El coeficiente medio de clustering de la red de la Figura 19 es 0.34, resultado de $(0.67*2+0.34*2+0*2) / 6$.

Distribución de clustering de la red: Se define como descripción de las frecuencias relativas de los nodos que tienen clustering distintos, que resulta una distribución. La distribución de clustering de la red de la Figura 19 muestra que hay 2 nodos con clustering 0.67 (centrales), hay 2 nodos con clustering 0.34 y 2 nodos con clustering 0 (periféricos) (ver Figura 23).

3.2.6. Comunidades

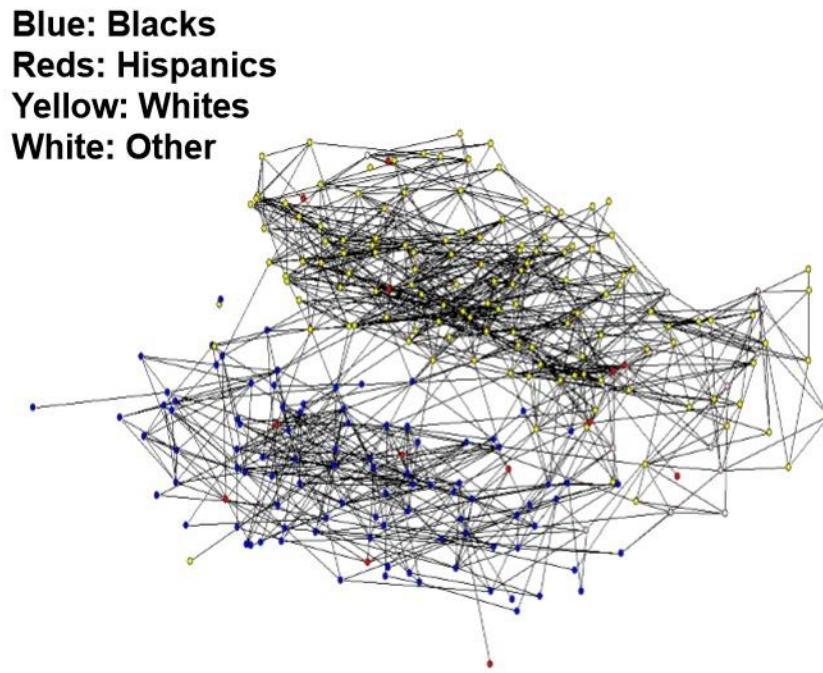
Las redes complejas presentan estructuras en las que ciertos grupos de nodos muestran una alta densidad de conexiones internas mientras mantienen enlaces más débiles con otros grupos. Porter *et al.* (2009) definen estos subconjuntos como comunidades, destacando que los nodos dentro de una comunidad están fuertemente interconectados, mientras que sus enlaces con nodos externos son menos frecuentes. Este fenómeno se observa en múltiples sistemas, especialmente en aquellos que representan interacciones sociales. Por ejemplo, en la red de la Figura 24 hay dos comunidades conectadas por los nodos 7 y 2.

Figura 24 - Ejemplo de red 8 nodos con dos comunidades. Fuente: Delgado (2014)



En redes que modelan sistemas humanos, la formación de comunidades resulta un rasgo característico. Currarini *et al.* (2009) analizaron la estructura de relaciones entre adolescentes en institutos de Estados Unidos y evidenciaron cómo los grupos tendían a organizarse en función de criterios étnicos. En su estudio, los estudiantes blancos y afroamericanos formaban comunidades separadas, mientras que los estudiantes hispanos actuaban como nodos de conexión entre ambos grupos. Este tipo de configuración pone de manifiesto el papel de ciertos nodos en la interconexión de comunidades, lo que puede influir en la propagación de información y la cohesión de la red (ver Figura 25). Se observó que había dos comunidades: blancos y afroamericanos y que los hispanos servían de puente entre ambas.

Figura 25 - Red de relaciones entre adolescentes americanos en los institutos. Fuente: Currarini et al. (2009)



Para identificar comunidades en redes complejas se utilizan diversas metodologías, entre ellas, la modularidad. Este indicador permite evaluar hasta qué punto la distribución de conexiones dentro de los grupos es más intensa que la esperada en una red aleatoria. Además, la modularidad ofrece la posibilidad de ajustar el coeficiente de resolución, lo que permite detectar comunidades con distintos niveles de granularidad según convenga en el análisis.

El cálculo de la modularidad se basa en la comparación entre la fracción de enlaces internos de un grupo y el valor esperado de dichos enlaces si estos se distribuyeran aleatoriamente. Matemáticamente, se expresa mediante la ecuación [2]:

$$M = \sum_{c=1}^k \left\{ \frac{A(V_i, V_i)}{l} - \left(\frac{\text{degree}(V_i)}{2l} \right)^2 \right\}, \quad [2]$$

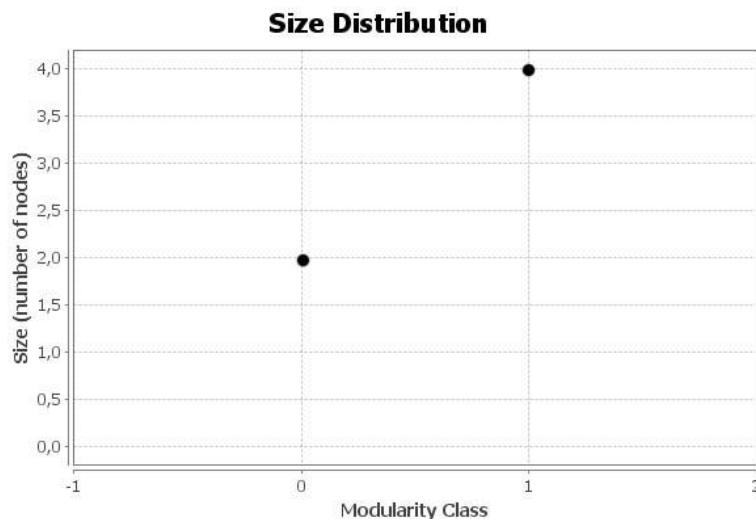
donde V_i es cada uno de los grupos que se forman en la red, l el número de links, A hace referencia a la media del grado de los distintos V_i y c y k serán los límites inferior e inferior de la iteración.

En el análisis de redes, la modularidad se emplea junto con otras métricas, como el PageRank y la centralidad de hubs. La combinación de estos indicadores permite caracterizar el papel de los nodos dentro de sus comunidades y evaluar su influencia en la estructura global de la red. Nodos con alta modularidad suelen estar fuertemente integrados en sus grupos, mientras que aquellos con menor modularidad pueden funcionar como puentes entre comunidades, desempeñando un papel clave en la conectividad del sistema. La modularidad de cada nodo en la red de la Figura 19 se recoge en la Tabla 3. Su distribución de modularidad muestra que hay 2 comunidades de 4 y 2 nodos, respectivamente (ver Figura 26).

Tabla 3 - Modularidad, Hubs y PageRank de la red. Fuente: Delgado (2014)

Nodo	Modularidad	PageRank	Hubs
1	1	0.203	0.2
2	0	0.212	0.2
3	1	0.203	0.2
4	0	0.085	0.1
5	1	0.212	0.2
6	1	0.085	0.1

Figura 26 - Ejemplo de distribución de modularidad en la red. Fuente: Delgado (2014)



3.2.7. Pagerank

El algoritmo PageRank, desarrollado y registrado por Google, permite asignar un valor cuantitativo a la importancia de los nodos dentro de una red. Su aplicación en el análisis de redes consiste en clasificar los nodos en función de la probabilidad de que un usuario, al recorrer la estructura, llegue a un nodo de manera no aleatoria. Este modelo incorpora una probabilidad de reinicio, que representa la frecuencia con la que un usuario reanuda su búsqueda desde un punto aleatorio, y un criterio de parada que determina el momento en que la simulación alcanza estabilidad.

El cálculo del ranking de un nodo A, $ER(A)$, se basa en la siguiente ecuación [3]:

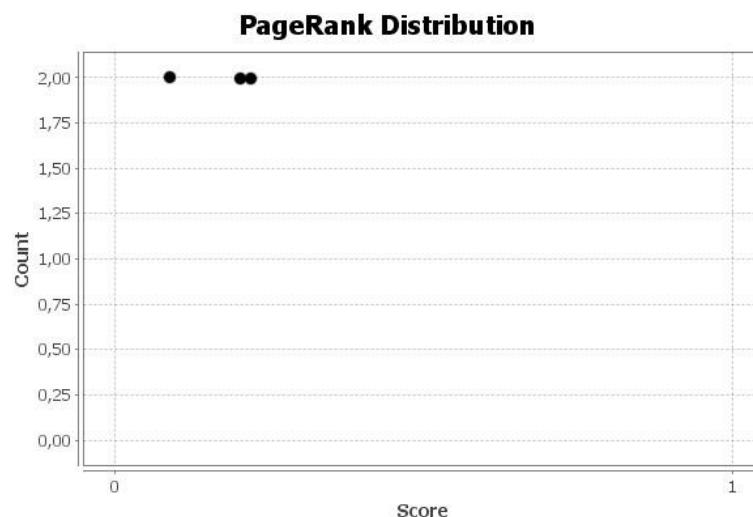
$$ER(A) = (1 - \alpha) + \alpha \left(\sum_{i=1}^n \frac{ER(U_i)}{C(U_i)} \right), \quad [3]$$

donde $\frac{ER(U_i)}{C(U_i)}$ representa los nodos que enlazan con A y α es un factor de amortiguación comprendido entre 0 y 1.

Para la clasificación de los nodos mediante PageRank, es necesario definir ciertos parámetros previos a la simulación. Uno de los más relevantes es la probabilidad α , un factor de amortiguación que, según la literatura especializada, suele fijarse en 0.85, valor utilizado por Google en su motor de búsqueda. Otro parámetro clave es el valor ϵ , que establece el criterio de parada del algoritmo; cuanto menor sea este valor, mayor será el tiempo necesario para alcanzar la convergencia.

El análisis del PageRank en una red concreta permite identificar nodos con mayor influencia en la estructura global. La distribución del PageRank de la red de la Figura 19 muestra que los nodos 2 y 5 alcanzan el valor más alto (0.212) (ver Figura 27). Esto sugiere que estos puntos tienen una mayor relevancia dentro del sistema en términos de conectividad y flujo de información.

Figura 27 - Ejemplo de distribución de pageRank en la red. Fuente: Delgado (2014)



3.2.8. Hubs y Autoridad

El algoritmo HITS asigna dos valores distintos a cada nodo dentro de una red: el valor de *authority*, que mide la relevancia de la información contenida en un nodo, y el valor de *hub*, que refleja la calidad de los enlaces salientes desde dicho nodo. Estos dos parámetros permiten identificar nodos que actúan como fuentes confiables de información y aquellos que facilitan la difusión del contenido en la red.

El cálculo del valor *hub* (h) se basa en la suma ponderada de los valores de *authority* de los nodos a los que apunta, siguiendo la ecuación [4]:

$$h = \frac{1}{\lambda_h} * AA^T h, \quad [4]$$

donde A es la matriz de adyacencia, $A^T A$ su traspuesta y $\frac{1}{\lambda_h}$ los autovalores asociados.

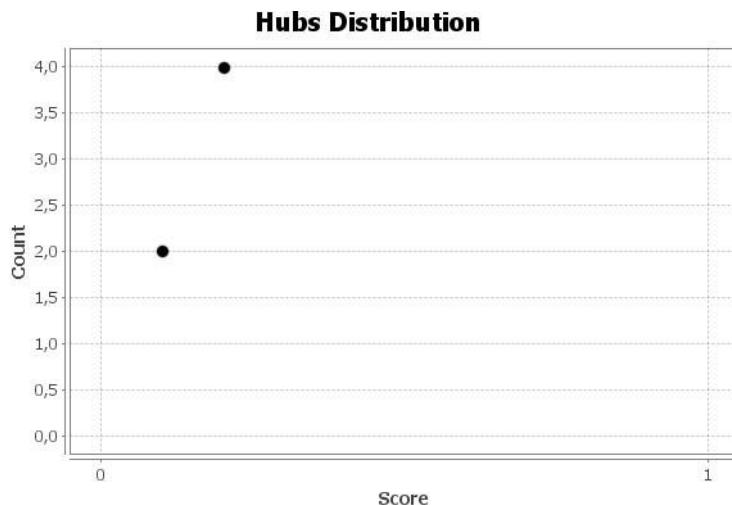
Por otro lado, el valor *authority* (a) se obtiene mediante la suma ponderada de los valores *hub* de los nodos que enlazan con él, conforme a la ecuación [5]:

$$a = \frac{1}{\lambda_a} * A^T A a, \quad [5]$$

donde los parámetros mantienen la misma definición que en el caso anterior. Sin embargo, dado que el análisis de este estudio no se centra en redes dirigidas, el valor de *authority* no será considerado.

En términos de distribución de *hubs*, se hace referencia a la frecuencia relativa de nodos con diferentes niveles de conectividad dentro de la estructura. Los valores de *hub* de la red de la Figura 19 se presentan en la Tabla 3. La representación gráfica de la distribución muestra que los nodos 1, 2, 3 y 5 destacan en la red según este criterio (ver Figura 28).

Figura 28 - Ejemplo de distribución de *hubs* en la red. Fuente: Delgado (2014)



Un modelo teórico fundamental para comprender la aparición de *hubs* es la Red de Barabási-Albert (1999). En este tipo de redes, los *hubs* se representan mediante nodos de mayor tamaño en la Figura 29. Estas redes se caracterizan por seguir una distribución de grado basada en una ley de potencias, lo que implica que un número reducido de nodos tendrá una gran cantidad de enlaces, mientras que la mayoría contará con una cantidad limitada de conexiones (ver Figura 30).

Figura 29 - Red de Barabási-Albert. Fuente: Delgado (2014)

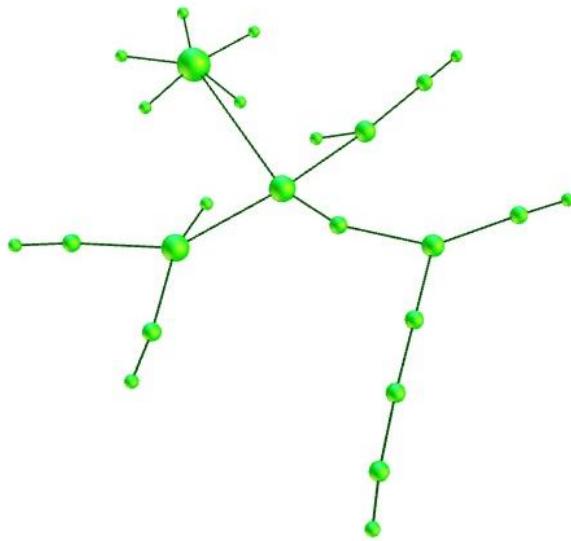
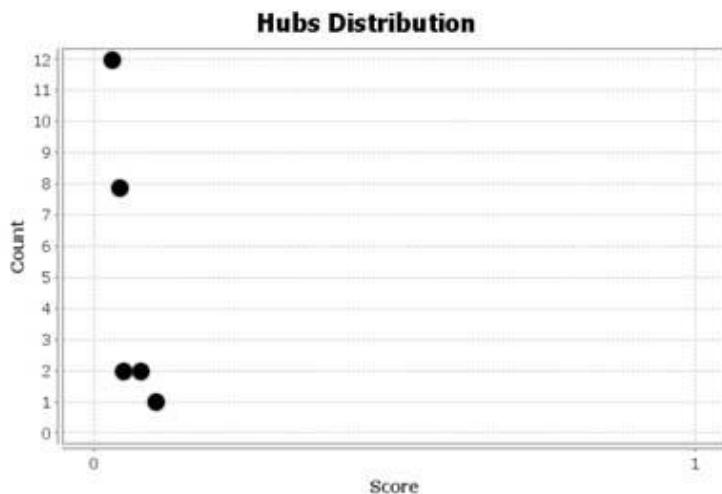


Figura 30 - Distribución de hubs en la red. Fuente: Delgado (2014)



3.2.9. Centralidad y Prestigio

La centralidad es una medida que permite identificar la importancia relativa de ciertos nodos dentro de una red, determinando cuáles están mejor conectados. En el caso de redes dirigidas, esta medida se conoce como prestigio, aunque el concepto sigue siendo el mismo.

Una de las métricas más utilizadas para cuantificar la centralidad es la centralidad de grado, que se obtiene normalizando el grado de un nodo, es decir, el número de conexiones directas que mantiene con otros nodos. Mientras que el grado en sí solo permite comparaciones dentro de la misma red, su normalización hace posible la

comparación entre distintas redes. La expresión matemática [6] que define esta medida es:

$$\text{Centralidad grado } (n) = \frac{\text{grado}(n)}{\text{número de nodos}} \quad [6]$$

La distribución de la centralidad de grado describe la frecuencia relativa de los nodos según su conectividad, proporcionando una visión global de la estructura de la red.

Los valores de centralidad de grado de cada nodo de la red de la Figura 19 están recogidos en la Tabla 4. Por ejemplo, para el nodo 1, la centralidad de grado es 0.5, resultado de dividir sus 3 conexiones entre los 6 nodos totales de la red. Según esta métrica, los nodos con mayor centralidad de grado son los nodos 1, 2, 3 y 5. La distribución de estos valores muestra que hay cuatro nodos con una centralidad de grado de 0.5, lo que indica que estos nodos tienen una posición relevante dentro de la estructura analizada (ver Figura 31).

Tabla 4 - Valores de centralidad de cada nodo. Fuente: Delgado (2014)

Nodo	Grado	Closeness	Closeness normalizada	Betweenness	Betweenness normalizada	Eigenvector
1	0.5	1.4	0.714	2	0.2	1
2	0.5	1.6	0.625	4	0.4	0.855
3	0.5	1.4	0.714	2	0.2	1
4	0.167	2.4	0.416	0	0	0.316
5	0.5	1.6	0.625	4	0.4	0.855
6	0.167	2.4	0.416	0	0	0.316

La centralidad de grado es la métrica más sencilla, ya que solo considera la cantidad de enlaces de un nodo sin analizar su posición en la red.

La centralidad de cercanía evalúa qué tan próximo está un nodo respecto a todos los demás. Un nodo con un alto valor de esta métrica tiene una menor distancia media hacia los demás, lo que le permite facilitar la transmisión de información. Para obtener comparaciones objetivas con otras redes, esta métrica se normaliza. La ecuación utilizada es [7]:

$$\text{Centralidad closeness } n = e^T n S1, \quad [7]$$

donde S es la matriz con los caminos más cortos entre pares de nodos, 1 es el vector unidad y e^T es un vector fila con todos sus elementos en 0 excepto el que corresponde al nodo analizado, que toma el valor 1 .

La distribución de la centralidad de closeness describe la frecuencia relativa de los nodos según esta métrica. En la red de la Figura 19, los nodos con los valores más altos son el 1 y el 3 , los cuales están más próximos al resto. Para el nodo 1 , su valor es 0.714 , obtenido de la relación $5 / (1+1+2+1+2)$, donde los nodos 2 , 3 y 5 están a una distancia de 1 y los nodos 4 y 6 a una distancia de 2 . La distribución de centralidad de closeness normalizada muestra que estos dos nodos son los más centrales con un valor de 0.714 (ver Figura 32).

La centralidad de intermediación mide la cantidad de veces que un nodo aparece en los caminos más cortos entre otros nodos de la red. Un nodo con un valor alto en esta métrica juega un papel clave en la transmisión de información. Su ecuación es [8]:

$$\text{Centralidad betweenness}_i = \sum_{j,k}^n \frac{B_{nn'n''}}{B_{nn''}}, \quad [8]$$

donde $B_{nn'n''}$ es la cantidad de caminos mínimos entre n y n'' , y $B_{nn''}$ es la cantidad de estos caminos que pasan por n' .

La distribución de la centralidad de betweenness refleja la frecuencia relativa de los nodos con distintos valores en esta métrica. En la red de la Figura 19, los nodos 2 y 5 tienen los valores más altos. Para el nodo 1 , su centralidad de betweenness es 0.2 , calculada con la expresión $4*(1/2) / (5*4/2)$, ya que se encuentra en los caminos más cortos entre 2 y 5 , 2 y 6 , 4 y 5 , y 4 y 6 , aunque cada uno cuenta la mitad porque también es posible pasar por el nodo 3 . La distribución de esta métrica normalizada muestra que los nodos 2 y 5 tienen un valor de 0.4 , lo que indica su importancia estructural en la red (ver Figura 33).

Figura 31 - Distribución de centralidad de grado en la red. Fuente: Delgado (2014)

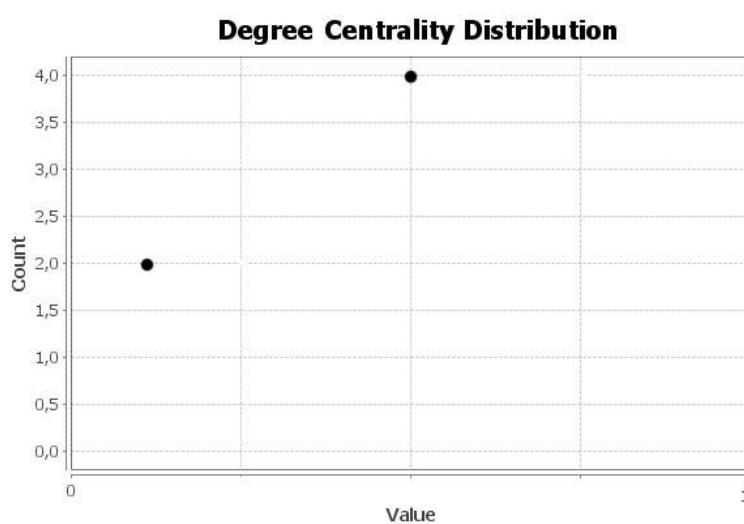


Figura 32 - Distribución de centralidad closeness en la red. Fuente: Delgado (2014)

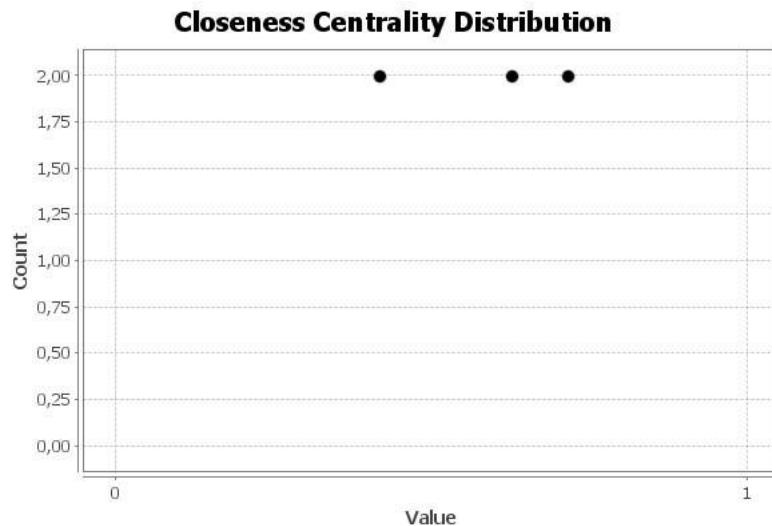
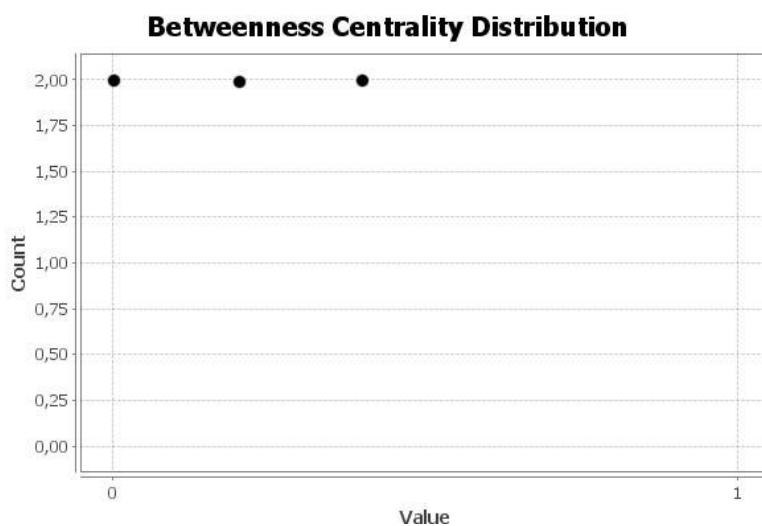


Figura 33 - Distribución de centralidad betweenness en la red. Fuente: Delgado (2014)



Cada medida de centralidad resalta diferentes aspectos de la red, por lo que la elección de la métrica dependerá del objetivo del análisis. La centralidad de grado identifica los nodos con más conexiones, la centralidad de closeness resalta los nodos con mejor acceso a los demás y la centralidad de betweenness destaca los nodos clave en la conexión entre otros nodos.

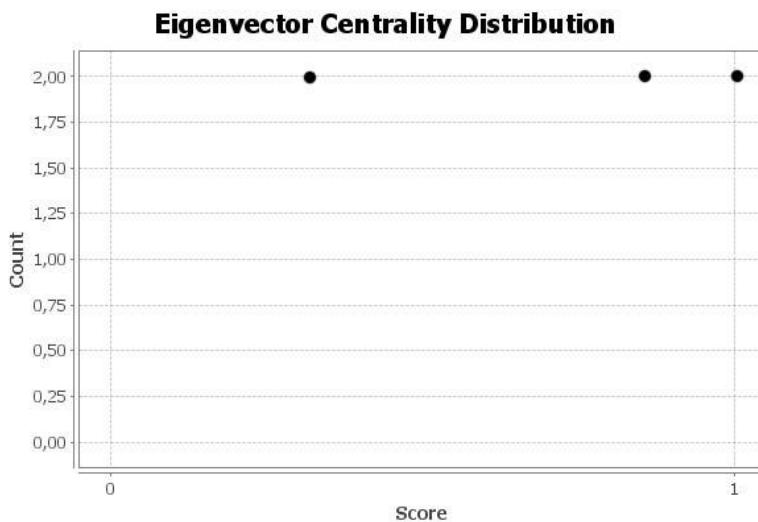
La centralidad de eigenvector mide la importancia de un nodo considerando la relevancia de los nodos a los que está conectado. No solo importa la cantidad de conexiones, sino también qué tan influyentes son esos vecinos. Un nodo con alta centralidad eigenvector está conectado a otros nodos que, a su vez, tienen muchas conexiones significativas. Su cálculo se basa en la ecuación [9]:

$$\text{Centralidad eigenvector} = e^T_n * \sum_{l=1}^{\infty} \left(\left(A \frac{1}{\lambda} \right)^l \right) 1, \quad [9]$$

donde e^T_n es un vector con valor 1 en la posición del nodo n y 0 en el resto, A es la matriz de adyacencia y $A \frac{1}{\lambda}$ es el autovalor correspondiente.

En la red de la Figura 19, los nodos 1 y 3 tienen los valores más altos en esta métrica (ver Tabla 4). Para el nodo 1, el valor de centralidad eigenvector es 1. La distribución de esta métrica normalizada muestra que los nodos 1 y 3 tienen un valor de 1, lo que los posiciona como los más influyentes dentro de la red (ver Figura 34).

Figura 34 - Distribución de centralidad eigenvector en la red. Fuente: Delgado (2014)



3.2.10. Robustez

Cuando se estudian redes, uno de los aspectos más importantes a evaluar es su robustez, es decir, la capacidad que tiene una red para seguir funcionando incluso cuando enfrenta fallos o pérdidas de conexiones. Este concepto es clave en distintos tipos de redes, desde sistemas de transporte hasta redes informáticas o sociales. En términos generales, una red robusta es aquella que, aunque sufra perturbaciones, sigue permitiendo la comunicación entre sus nodos sin que se vea comprometido su funcionamiento global.

Para analizar esta robustez, además de utilizar los distintos parámetros que se han descrito previamente que permiten evaluar la estructura y resistencia de la red ante fallos, se presentan otros nuevos para poder completar este análisis con la descripción de cada uno aportada en (Wang, 2017).

- Meshedness: mide el grado de interconexión de la red. Una red con un alto meshedness tiene múltiples caminos alternativos entre sus nodos, lo que le permite ser más resistente ante la pérdida de enlaces. Se calcula mediante la ecuación [10]:

$$\text{Meshedness} = \frac{L-N+1}{2N-5}, \quad [10]$$

donde N es el número de nodos y L es el número de aristas.

- Conducción: analiza la facilidad con la que la información o los flujos de la red pueden moverse entre los nodos. Una conducción alta indica que la red es eficiente y permite un rápido intercambio de datos o recursos. Se calcula mediante [11]

$$Conducción = \frac{N-1}{N \sum_{i=1}^{N-1} \mu_i}, \quad [11]$$

donde μ_i es el valor del eigenvector.

- Reliability: se refiere a la fiabilidad de la red, es decir, su capacidad para mantener un rendimiento estable a pesar de posibles fallos. En redes de transporte o de comunicación, esto se traduce en una menor probabilidad de interrupciones.
- Conectividad algebraica: este parámetro mide la cohesión estructural de la red. Cuanto mayor sea su valor, más difícil será fragmentarla, lo que significa que seguirá funcionando incluso si algunos enlaces desaparecen. Se calcula conociendo el valor del segundo menor autovalor de la matriz Laplaciana, puesto que coinciden

El indicador de robustez r^T funciona como una métrica de robustez para redes. Cuantifica la robustez de una red de metro en términos del número de caminos alternativos en la topología de la red dividido por el número total de estaciones en el sistema, se calcula mediante la siguiente fórmula [12]:

$$r^T = \frac{\ln(L - N + 2)}{N}, \quad [12]$$

El análisis de robustez es especialmente útil en redes críticas, como las de comunicación, energía o transporte, donde garantizar su estabilidad es fundamental para evitar colapsos o interrupciones graves en el servicio. Al aplicar estos parámetros, es posible diseñar redes más eficientes, resilientes y adaptadas a las necesidades de cada sistema.

3.3. Gephi

Gephi es un software de código abierto especializado en la visualización y el análisis de redes complejas (disponible en <https://gephi.org/users/download/>). Se ha convertido en una herramienta fundamental para investigadores, analistas de datos y científicos sociales que buscan representar y explorar redes en diferentes disciplinas. Su diseño intuitivo y su potencia en el procesamiento de grandes volúmenes de datos lo han consolidado como una de las opciones más versátiles en el ámbito del análisis de grafos.

3.3.1. Características generales

Gephi permite visualizar datos en forma de redes donde los elementos se representan como nodos y las relaciones entre ellos como enlaces. Gracias a su interfaz interactiva

y personalizable, los usuarios pueden manipular gráficamente los nodos y enlaces para identificar patrones, estructuras y comunidades dentro de la red.

El programa proporciona múltiples algoritmos de disposición que organizan los nodos en función de sus conexiones, lo que facilita la interpretación de los datos. También incorpora herramientas avanzadas de filtrado y manipulación de datos que permiten realizar análisis específicos según las necesidades del usuario.

3.3.2. Aplicaciones de Gephi

El uso de Gephi se extiende a diversos campos que requieren el análisis de estructuras de datos complejas. La flexibilidad de Gephi lo convierte en una herramienta poderosa para cualquier disciplina que requiera representar e interpretar redes de información. En el ámbito de las redes sociales ayuda a visualizar relaciones entre usuarios, detectando comunidades, influencers y patrones de interacción. En biología, se aplica para estudiar redes genéticas y relaciones entre proteínas. En economía, facilita el análisis de flujos financieros y transacciones comerciales. En ciberseguridad, permite identificar vulnerabilidades en redes informáticas y detectar posibles ataques.

3.3.3. Funcionalidades avanzadas de Gephi

Gephi ofrece un amplio conjunto de herramientas para realizar análisis profundos y detallados de redes. Entre sus funcionalidades más destacadas se encuentran los algoritmos de análisis de redes, como el PageRank, HITS, Centralidad de Grado, Centralidad de Cercanía y Centralidad de Betweenness, entre otros. Estos algoritmos permiten calcular la importancia de los nodos dentro de la red, detectar nodos clave, identificar comunidades y estudiar cómo se propaga la información a través de la red.

Uno de los aspectos más poderosos de Gephi es su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos. Gracias a su arquitectura basada en la memoria, el programa puede procesar redes complejas con millones de nodos y enlaces, permitiendo a los usuarios realizar análisis en tiempo real. Gephi también se destaca por su capacidad de exportación y personalización. Los usuarios pueden exportar tanto los gráficos como los resultados del análisis en diferentes formatos, como PDF, CSV o PNG, lo que facilita la presentación y documentación de los resultados. Además, los gráficos generados pueden personalizarse de diversas maneras, desde los colores y tamaños de los nodos hasta la disposición de estos en el espacio, lo que permite una visualización más clara y comprensible. Esto facilita la creación de representaciones visuales que pueden ser utilizadas para ilustrar conclusiones, generar informes o comunicar resultados a audiencias más amplias.

3.3.4. Optimización de rendimiento

Gephi ha sido diseñado para ser escalable, lo que significa que puede manejar redes de diferentes tamaños, desde pequeñas redes locales hasta grandes redes globales con

millones de nodos y enlaces. El motor de procesamiento está diseñado para aprovechar al máximo la memoria RAM, lo que permite que las operaciones de análisis y renderizado se realicen rápidamente incluso cuando se trabaja con conjuntos de datos grandes. Esta optimización también permite que el software se ejecute de manera eficiente en ordenadores de recursos limitados.

3.3.5. Comunidad y soporte

Al ser un software de código abierto, Gephi cuenta con una comunidad activa que constantemente contribuye a su desarrollo y mejora. Esto ha dado lugar a una gran variedad de complementos y extensiones que amplían las funcionalidades del software. Los usuarios pueden acceder a una gran cantidad de recursos, como tutoriales y documentación técnica, que les permiten sacar el máximo provecho de la herramienta. Además, la comunidad organiza eventos y foros donde los usuarios pueden compartir conocimientos, resolver dudas y discutir nuevas aplicaciones del software.

La plataforma también ofrece soporte a través de su página web oficial (<https://gephi.org/>), donde los usuarios pueden descargar la última versión del programa, obtener acceso a recursos adicionales, consultar la documentación y participar en foros de discusión.

3.3.6. Gephi como herramienta

Las ventajas de Gephi en el análisis de redes son numerosas y muy destacadas en comparación con otras herramientas similares. Una de sus principales fortalezas es la facilidad de uso. Aunque es una herramienta potente, su interfaz es sencilla de comprender y no requiere una curva de aprendizaje pronunciada. Los usuarios pueden comenzar a trabajar con ella de manera rápida, obteniendo resultados de forma eficiente y en poco tiempo.

Además, Gephi se distingue por su capacidad para realizar un análisis de redes a gran escala, lo que lo convierte en una opción ideal para trabajar con redes complejas. Su habilidad para procesar grandes volúmenes de datos permite manejar miles de nodos y enlaces sin que el rendimiento se vea comprometido, lo que es crucial cuando se tratan redes de gran tamaño.

La visualización intuitiva es otra ventaja, gracias a sus potentes herramientas gráficas, Gephi permite a los usuarios visualizar, modificar e interpretar redes de manera clara y detallada. Esto facilita enormemente la identificación de patrones y anomalías dentro de los datos, ayudando a descubrir relaciones clave que de otro modo podrían pasar desapercibidas.

Finalmente, el hecho de ser un software de código abierto ha permitido a Gephi contar con una comunidad activa y un soporte continuo, lo que asegura su evolución constante. Lo que aporta el desarrollo de diversos plugings que han sido utilizados para el desarrollo de la red generada.

4. La red de cercanías de Madrid

4.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo analizar el servicio de cercanías en Madrid, centrándonos en su eficiencia, organización y cómo se gestionan los recursos. La red de cercanías, que opera Renfe y ADIF, es fundamental para que los madrileños se desplacen por la ciudad y sus alrededores. Con más de 300 km de recorrido, conecta muchos puntos de la Comunidad de Madrid y transporta a millones de personas cada año, siendo clave para mejorar el transporte público en la ciudad. Cada año, más de 250 millones de personas viajan en Madrid en Renfe Cercanías, lo que representa casi la mitad de los pasajeros de Renfe.

La elección de la red de cercanías de Madrid para este estudio no es debido a que sea una de las más grandes de Europa, comparando con algunas de las más relevantes como Londres o París, sino más por la cercanía geográfica y por la importancia en la vida cotidiana de todos los madrileños. Al analizar cómo funciona, podremos entender mejor cómo se gestionan sus recursos hacer frente a desafíos, como la congestión y la necesidad de mantener los tiempos de espera y la puntualidad.

Las estaciones de Atocha y Chamartín son las dos estaciones más importantes en esta red. Atocha, como centro de transporte principal, conecta varias líneas de cercanías y permite que los pasajeros cambien de una línea a otra fácilmente, conectando diferentes partes de la ciudad y los alrededores. Chamartín, también es clave, sobre todo en el norte de Madrid ya que con el Proyecto Madrid Nuevo Norte su importancia seguirá creciendo.

En este capítulo se analiza la estructura de la red, analizando con datos históricos de tráfico por las líneas del sistema proporcionados por la operadora, determinar la estructura de la red mediante la teoría de Grafos y así comparar con sistemas desarrollados en otros países comparando su robustez.

Este trabajo usa herramientas de simulación, utilizando el programa Gephi para analizar los flujos de pasajeros, identificar los puntos críticos y poder ver en qué medida se comparan con el resto de las estaciones proporcionalmente.

4.2. Análisis de la conectividad en la red ferroviaria española para el transporte de pasajeros

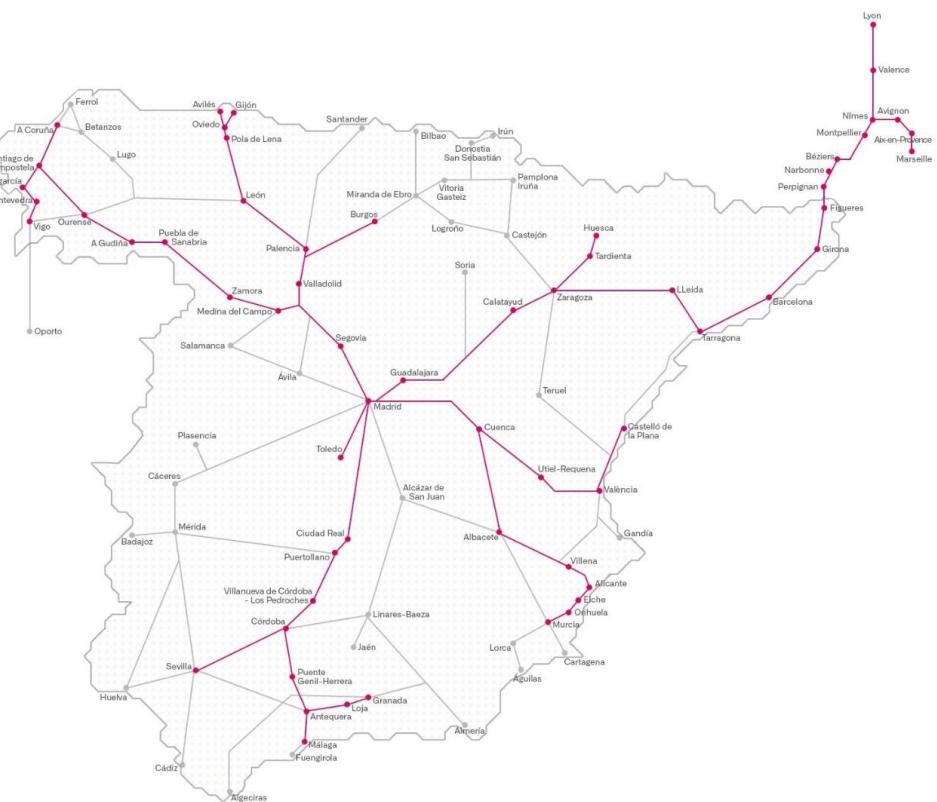
En este análisis de la red de cercanías de Madrid, no podemos dejar de lado cómo se conecta Madrid con el resto del país. La red ferroviaria española tiene una importancia crucial en el transporte de pasajeros, no solo conecta Madrid con otras ciudades, sino que también facilita el intercambio entre cercanías y trenes de largo recorrido, como el AVE.

El análisis de la conectividad de la red ferroviaria española nos permite entender mejor la estructura y la operatividad del transporte público en su conjunto. Este apartado analiza la capacidad de la red para conectar nodos urbanos, industriales e internacionales, considerando tanto la movilidad de pasajeros como el transporte de mercancías. También ayuda a contextualizar las estaciones de Atocha y Chamartín, y a comprender cómo se conectan las redes de largo y medio alcance españolas con la red de cercanías de Madrid.

4.2.1. Alcance red ADIF

La red ferroviaria española de alta velocidad conecta 50 ciudades (ver Figura 35, trazo fucsia) y la larga distancia añade otras 32 estaciones a la red (ver Figura 35, trazo gris). Está integrada parcialmente con los sistemas europeos a través de corredores como el Mediterráneo y el Atlántico, pero las diferencias en el ancho de vía y los sistemas técnicos representan barreras para una interoperabilidad efectiva. Estas limitaciones reducen la competitividad del transporte ferroviario internacional, especialmente en el ámbito de las mercancías.

Figura 35 - Red Ferroviaria Española AV. Fuente – Renfe



La red de alta velocidad española es la más extensa de Europa y la segunda a nivel mundial, con más de 4.000 kilómetros de vías operativas. A pesar de su envergadura, España se sitúa en el séptimo puesto en número de pasajeros transportados dentro del contexto de la alta velocidad ferroviaria. En 2024, alcanzó un récord de 39 millones de pasajeros, reflejando un crecimiento sostenido en la demanda de este medio de transporte (Europa Press, 2024).

4.2.2. Nodos red española

Madrid y Barcelona destacan por la densidad de sus estaciones y su capacidad para absorber grandes volúmenes de pasajeros. La coincidencia de muchos de estos nodos de la red de cercanías con estaciones de metro o bus hace que aumente su afluencia de pasajeros y que sea aún más relevante en la movilidad de los habitantes de las ciudades. Las estaciones de Atocha y Chamartín están diseñadas para manejar un alto volumen de pasajeros y actúan como hubs para conexiones nacionales e internacionales. Madrid Atocha, es un punto de conexión clave entre el este y el sur del país, además de crear un puente de conexión importante con Barcelona Sants. Mientras que Madrid Chamartín por su parte, es un enlace del centro del país con la sección norte.

Las estaciones de media distancia están distribuidas por toda España, conectando áreas rurales y urbanas. Estaciones como Zaragoza Delicias y Valladolid Campo Grande son ejemplos de nodos intermedios que manejan tanto servicios de alta velocidad como de media distancia. Muchas de estas estaciones enfrentan retos de modernización, especialmente en términos de accesibilidad y conectividad con otros modos de transporte, además de la intermodalidad con la creación de estaciones que conectan el ferrocarril con otros modos de transporte.

4.3. Análisis de la conectividad en la red cercanías de Madrid

Una vez contextualizado la distribución de la red española y cómo puede afectar a la conectividad, se procede a entrar en detalle en el análisis de la red de cercanías de Madrid. En primer lugar, se estudiará su distribución en cuenta a nodos y las líneas de pasajeros que actúan en ellos para poder desarrollar la maqueta que se utilizará para el análisis.

4.3.1. Nodos de la red cercanías de Madrid

Los nodos en una red de transporte, como la de Cercanías de Renfe en Madrid, representan puntos clave donde se concentran los flujos de pasajeros y se conectan diferentes líneas o servicios. La red de Cercanías de Renfe en Madrid está formada por 92 nodos. El listado completo de todos los nodos de la red de cercanías está disponible en el Anexo 1, donde se incluye su localización (latitud y longitud) y el total de pasajeros que entran o salen a la cada estación en un día laboral en la hora punta de las 8:30 (weight). Este archivo en formato Excel permite generar la red en Gephi.

En primer lugar, se destacan dos nodos fundamentales que funcionan como puntos de intercambio y distribución de pasajeros: Atocha y Chamartín, con 21775 y 7099 pasajeros en la hora punta, respectivamente. Estas estaciones son consideradas los centros neurálgicos de la red de Cercanías de Madrid por su alta capacidad de conexión

con diferentes líneas de cercanías, su afluencia de pasajeros y la interconexión con otros modos de transporte como la alta velocidad, el metro, y los autobuses urbanos.

Además de Atocha y Chamartín, existen otros nodos igualmente importantes en la red de Cercanías de Madrid. Nuevos Ministerios, Sol, Recoletos y Méndez Álvaro son estaciones estratégicas que conectan varias líneas de Cercanías con diversas líneas de metro, en especial la estación de Sol, autobuses e incluso servicios de bicicletas compartidas, lo que facilita los desplazamientos dentro de la ciudad. Este tipo de interconexión ha sido algo altamente impulsado en los últimos años para reducir la dependencia del automóvil privado, promoviendo el uso de transporte público y contribuyendo al desahogo de la congestión urbana.

También debe hacerse referencia a los nodos del borde la red. Estos nodos son estaciones de final de línea como El Escorial, Cotos, Colmenar Viejo, Alcobendas/San Sebastián de los Reyes, Aeropuerto T4, Guadalajara, Aranjuez, Parla, Humanes y Móstoles-El Soto. Son puntos de la red con una menor afluencia, impulsando la movilidad inmobiliaria hacia las inmediaciones de la ciudad para aliviar la carga en el centro y promover nuevos proyectos como el de Madrid norte.

Otras estaciones como Villalba, Cercedilla, Príncipe Pío, Alcalá de Henares y Fuente la Mora; son estaciones fin de línea, pero no se encuentran en el borde la red. Estas ofrecen más opciones de movilidad directa de los pasajeros, sin tener que realizar trayectos hacia las estaciones centrales de conexión donde no se necesita su tránsito, permitiendo cambiar de línea previamente.

La identificación y análisis de estos nodos es fundamental para mejorar el diseño y la operativa de la red de Cercanías, pues un buen funcionamiento de estos puntos de intercambio facilita el acceso de los usuarios a diferentes opciones de conexión entre localizaciones, mejorando los flujos de pasajeros y permite gestionar la demanda en horas punta.

4.3.2. Líneas de cercanías de Renfe Madrid

La red de Cercanías de Madrid está estructurada en varias líneas, identificadas como C-1 a C-10 (ver Figura 36), cada una diseñada para atender flujos de movilidad específicos. En total, hay 143 conexiones entre estaciones. El listado completo de las conexiones entre estaciones está disponible en el Anexo 2, donde todas tienen un peso cercano a 1 pero con pequeñas variaciones para que no se superpongan y oculten en el grafo, son del tipo no dirigida y su nombre (que coincide con el nombre de la línea de tren). Este archivo en formato Excel permite generar la red en Gephi.

- **C-1:** Aeropuerto T4 - Valdebebas - Fuente de la Mora - Chamartín
- **C-2:** Guadalajara - Azuqueca - Meco - Alcalá de Henares Universidad - Alcalá de Henares - La Garena - Soto del Henares - Torrejón de Ardoz - San Fernando - Coslada - Vicálvaro - Santa Eugenia - Vallecas - El Pozo - Asamblea de Madrid- Entrevías - Atocha - Recoletos - Nuevos Ministerios - Chamartín
- **C-3:** Aranjuez - Ciempozuelos - Valdemoro - Pinto - Getafe Industrial - Getafe Sector 3 - Las Margaritas Universidad - Villaverde Bajo - Atocha - Sol - Nuevos Ministerios - Chamartín - Ramón y Cajal - Pitis - El Goloso - Cantoblanco Universidad - Tres Cantos

- **C-4:** Parla - Getafe Centro - Las Margaritas Universidad - Villaverde Alto - Atocha - Sol - Nuevos Ministerios - Chamartín - Ramón y Cajal - Pitis - El Goloso - Cantoblanco Universidad - Tres Cantos - Colmenar Viejo
- **C-5:** Móstoles El Soto - Móstoles - Las Retamas - Alcorcón - San José de Valderas - Cuatro Vientos - Las Águilas - Maestra Justa Freire - Aluche - Laguna - Embajadores - Atocha - Méndez Álvaro - Doce de Octubre - Orcasitas - Puente Alcocer - Villaverde Alto - Zarzaquemada - Leganés - Parque Polvoranca - La Serna - Fuenlabrada - Humanes
- **C-7:** Alcalá de Henares - La Garena - Soto del Henares - Torrejón de Ardoz - San Fernando - Coslada - Vicálvaro - Santa Eugenia - Vallecas - El Pozo - Asamblea de Madrid-Entrevías - Atocha - Recoletos - Nuevos Ministerios - Chamartín - Fuente de la Mora - Valdebebas - Aeropuerto T4
- **C-8:** Chamartín - Nuevos Ministerios - Recoletos - Atocha - Villaverde Bajo - Getafe Sector 3 - Las Margaritas Universidad - Getafe Centro
- **C-9:** Cercedilla - Puerto de Navacerrada - Cotos
- **C-10:** Villalba - Las Rozas - Majadahonda - El Barrial-Centro Comercial Pozuelo - Pozuelo - Aravaca - Príncipe Pío - Pirámides - Delicias - Méndez Álvaro - Atocha - Recoletos - Nuevos Ministerios - Chamartín - Ramón y Cajal - Pitis - El Goloso - Cantoblanco Universidad - Tres Cantos - Colmenar Viejo

La línea C-6 de Cercanías Madrid dejó de existir en el año 2011 debido a una reestructuración del servicio de Renfe Cercanías. Hasta ese momento, la C-6 cubría el trayecto entre Madrid-Atocha y Villalba, pero su recorrido fue absorbido por otras líneas, principalmente la C-10 y la C-3.

Todas estas líneas, excepto la C-9 que excluiremos del estudio ya que no se registran datos de la afluencia de pasajeros, se conectan en nodos clave como las estaciones de Atocha y Chamartín, que actúan como centros de distribución para los diferentes corredores. Las líneas más transitadas, como la C-5 que conecta Móstoles y Fuenlabrada con Madrid o la C-4 con Getafe, gestionan flujos intensos en horas punta, siendo esenciales para el acceso a áreas residenciales y zonas industriales.

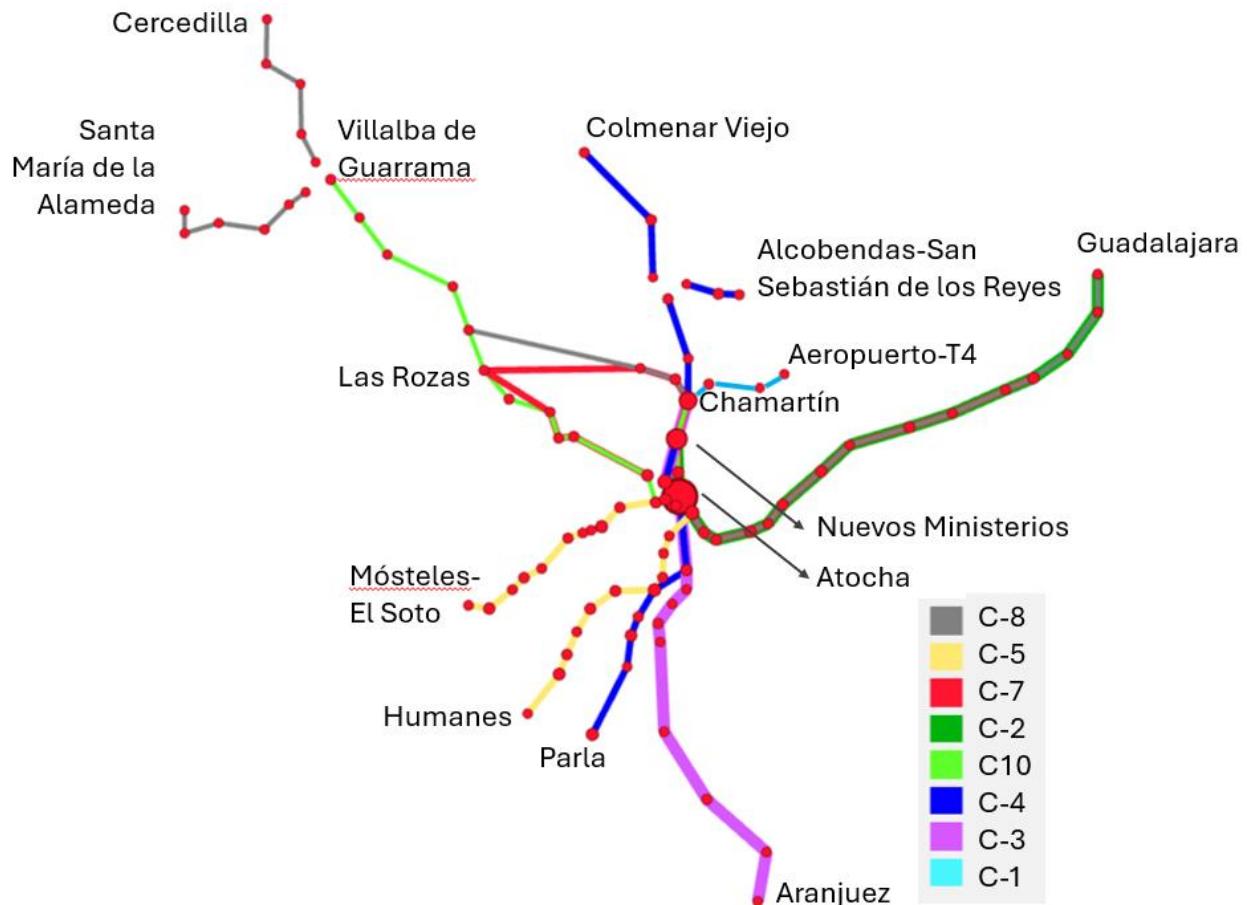
El área de Cercanías también desempeña un papel importante en la conectividad regional. Algunas líneas, como la C-3 y la C-4, se extienden hacia provincias cercanas, facilitando la movilidad de trabajadores y estudiantes que residen fuera de la Comunidad de Madrid, pero dependen de sus servicios para sus desplazamientos diarios.

La imagen de la red resultante con la que se ha trabajado en este estudio a través de Gephi se ha representado con los colores asignados a las líneas de cercanías de Madrid en la web de Renfe y con una geolocalización escalada de las estaciones en los nodos (ver Figura 37). En la Figura 37, el tamaño de los nodos está diferenciado de forma escalada según el tráfico de pasajeros en hora punta. Esto representa el número de viajeros que interactúan en cada estación según los datos obtenidos de la plataforma de Renfe donde podemos consultar el número de viajantes que suben y bajan de los trenes según la franja horaria. En este caso hemos elegido los datos en hora punta para que sea más representativo.

Figura 36 - Red Cercanías Madrid, Fuente: Renfe



Figura 37 - Red Cercanías Madrid Gephi, Fuente – Elaboración Propia



4.4. Propiedades de la red cercanías de Madrid

En el análisis de la red de Cercanías de Madrid, ciertas propiedades estructurales de la red tienen un impacto directo en su rendimiento y eficiencia, como el grado, la centralidad, el clustering y los hubs.

Estas propiedades, son clave para evaluar cómo la red de Cercanías de Madrid puede ser optimizada. Permiten identificar los puntos críticos donde se requieren mejoras, como en estaciones de alta centralidad o hubs congestionados. La aplicación de estas propiedades facilita la toma de decisiones sobre ampliaciones de la red, mejoras en la infraestructura y la planificación de nuevas conexiones que respondan mejor a las necesidades de los usuarios y a la demanda creciente de transporte público en la Comunidad de Madrid.

Durante las horas pico, principalmente entradas y salidas de los horarios de trabajo, las estaciones y trenes alcanzan su capacidad máxima, lo que afecta la puntualidad y la calidad del servicio. Por ello el análisis se realizará en los tramos de afluencia donde la red está más sobrecargada para ver su comportamiento en situaciones más extremas.

4.4.1. Grado

El grado de los nodos, que mide la cantidad de conexiones de cada estación, es fundamental para identificar los puntos clave de la red. Las estaciones con un alto grado son esenciales, puesto que concentran un gran volumen de pasajeros y actúan como centros de distribución, facilitando el intercambio entre diferentes líneas y modos de transporte. El grado, en este caso, permite analizar cómo las estaciones con más conexiones influyen en el flujo de pasajeros y en la eficiencia del servicio.

El grado promedio de la red de estaciones es de 3.087, lo que indica que, en promedio, cada estación está conectado con otros 3 destinos de línea. Sin embargo, al ver la distribución de grado en la Red de Cercanías de Madrid (ver Figura 38), observamos que los valores no se agrupan alrededor de este promedio. El listado completo con los valores de grado de todas las estaciones está disponible en el Anexo 3.

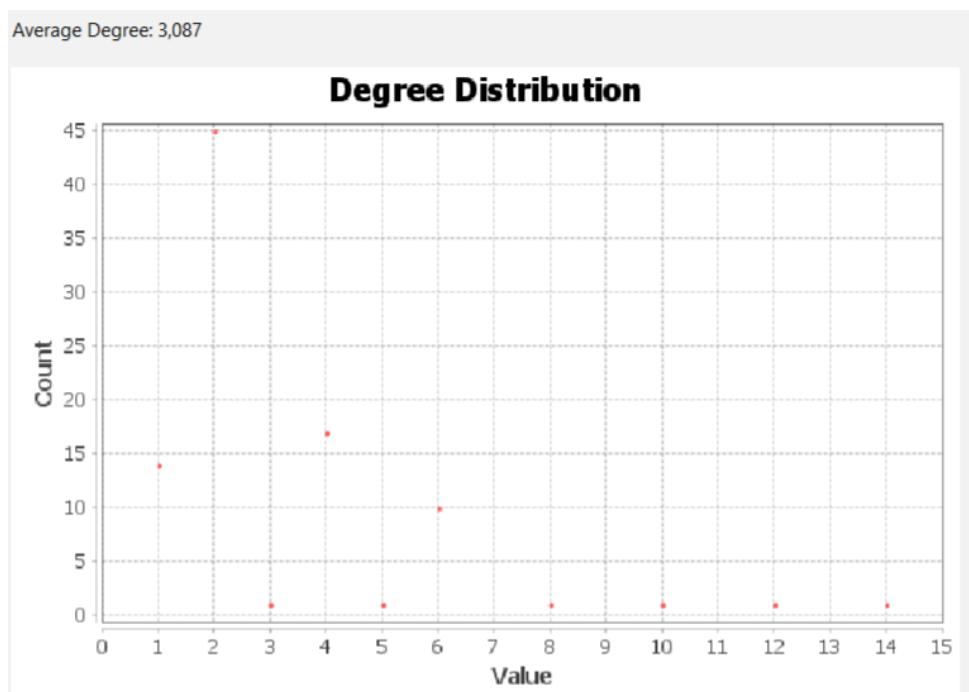
Esto significa que:

- Abunda la conexión clásica de nodo entre dos estaciones. Hay 45 nodos con un grado de 2 que se corresponden con las estaciones de línea y 14 nodos con un grado de 1 que se corresponde con las estaciones final de línea. Por tanto, el 50% de las estaciones tienen menos de 2 conexiones.
- Sólo el 3% de las estaciones tienen un grado alto (es decir, son nodos muy conectados). El nodo con el mayor grado es Madrid Atocha con 14, seguido de Nuevos Ministerios con 12 y Madrid Chamartín con 10. Estos nodos centrales de la red desvían la media. Además, estos nodos son los nodos con mayor afluencia de pasajeros de acuerdo con el tamaño de los nodos de la Figura 37.
- Un 25% de las estaciones tienen un grado entre 4 y 6, estas coinciden con los comienzos de las ramificaciones de la estructura en estrella antes de que se

vuelvan a dividir en los finales de línea. En estas estaciones coinciden varias líneas superpuestas.

Viéndolo en el contexto de la distribución de una ciudad como es la de Madrid, tiene sentido que el mayor número de conexiones se realice con el centro urbano y no aparezcan estas conexiones entre puntos del extrarradio, siendo las estaciones más céntricas en localización las que más grado tienen llegando a 10, 12 o 14 conexiones mientras que las más periféricas de la red, coincidiendo con los finales de línea son de grado 1 o 2.

Figura 38 - Distribución del Grado.



4.4.2. Densidad

La densidad de la red es de 0.034. Esto revela que, aunque la red está compuesta por una gran cantidad de nodos (un total de 92), el número de conexiones efectivas entre ellos es sorprendentemente bajo. Tiene solo 142 conexiones activas en comparación con las 4186 conexiones potenciales (E_{max}) que la red podría soportar cuando la densidad es máxima (esto es, tiene un valor de 1). Estos enlaces máximos se obtienen despejando de la ecuación [1], como muestra la ecuación [13]

$$E_{max} = 1 * \frac{92 * 91}{2} = 4186. \quad [13]$$

La razón principal de esta baja densidad es que existe una gran cantidad de nodos con muy pocas conexiones, lo que limita considerablemente el número total de enlaces en la red. Este comportamiento sugiere que muchos nodos están aislados o conectados solo a un número muy reducido de otros nodos, lo que impide que la red alcance su potencial completo en términos de interacciones o relaciones entre los nodos.

4.4.3. Paso Medio

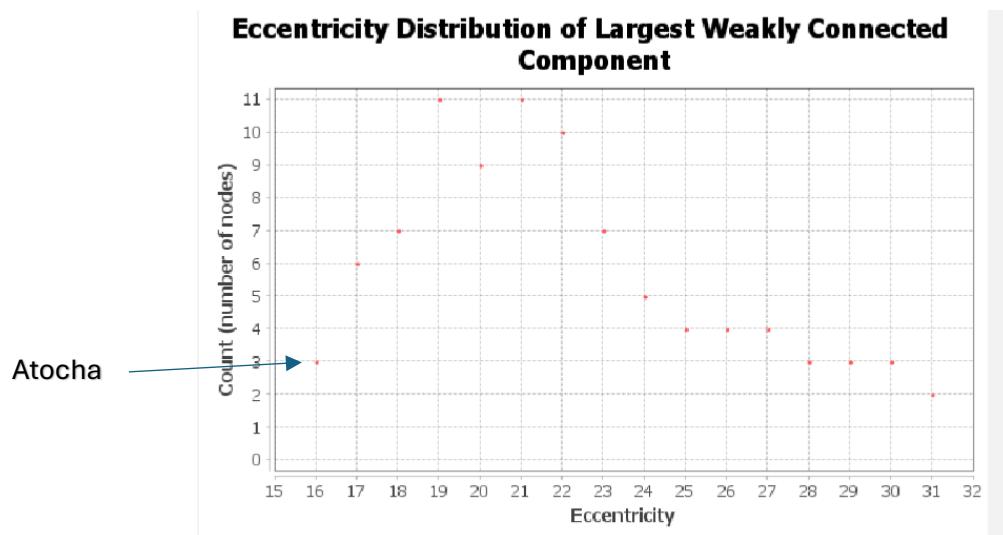
La longitud del camino medio en la red de estaciones es de 9.5, lo que indica que, aunque la red cuenta con 92 estaciones, la conectividad entre ellas es bastante escasa. En promedio, un viajero puede desplazarse de una localización cualquiera a otra realizando aproximadamente 9 paradas o escalas. Los desplazamientos transversales (de una línea a otra sin pasar por el centro) son limitados, obligando a los pasajeros a recorrer más estaciones de las necesarias en una red con más conexiones directas. Lo que sugiere que, siendo la red poco extensa, la distancia entre las estaciones es bastante grande, y es relativamente tedioso moverse de un punto a otro, teniendo que hacer muchas paradas.

Por otro lado, es importante también conocer los casos extremos, el número máximo de paradas que se deben hacer para llegar desde los puntos que tiene mayor número de estaciones entre ellos en línea es de 34. Si comparamos el paso medio con el caso más extremo la eficiencia en este aspecto no es mala. Además, el tiempo de las paradas de una red ferroviaria no puede ser comparado con otros medios de transporte que requieren mucho más tiempo, por lo que el número de paradas no sería un dato tan crítico para la puntualidad y satisfacción del pasajero.

4.4.4. Diámetro y Excentricidad

La excentricidad máxima de la red de estaciones es de 31. Esto significa que, para viajar entre las estaciones más distantes de la red, necesitaríamos hacer un total de 30 escalas. Al observar la distribución de la excentricidad (ver Figura 39), se observa que más del 70% de las estaciones tienen una excentricidad de 19 o superior. Las estaciones con menor excentricidad son aquellas más centralizadas (como Atocha con una excentricidad de 16, junto con Recoletos y Sol), seguido por estaciones de tamaño intermedio y juegan un papel clave en la conexión entre estaciones grandes (como Méndez Álvaro con una excentricidad de 17, junto con algunas como Embajadores o Nuevos Ministerios). En contraste, las más alejadas tienen la mayor excentricidad (como Cercedilla con una excentricidad de 31, junto con Santa María de la Alameda)

Figura 39 - Distribución excentricidad.



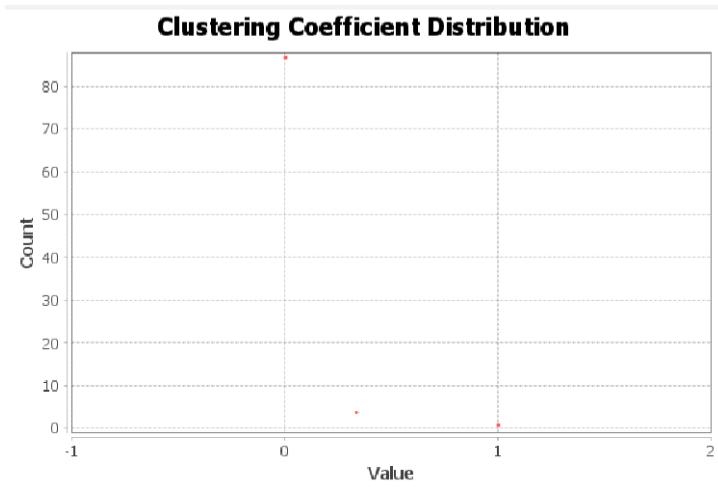
4.4.5. Clustering

El clustering, que mide la tendencia de los nodos a formar grupos, es otra propiedad relevante en este análisis. En la red de Cercanías de Madrid, áreas con alto clustering tienden a reflejar zonas con una demanda de transporte elevada, como aquellas donde se conectan barrios residenciales con grandes núcleos de empleo o zonas industriales. Este análisis ayuda a detectar las áreas donde se concentran los flujos de pasajeros y a tomar decisiones sobre la mejora de la frecuencia de trenes o la creación de nuevas conexiones que optimicen el servicio en esas zonas.

El coeficiente medio de agrupamiento en la red (clustering) es de 0,031. Al observar la distribución del coeficiente de agrupamiento en la red (ver Figura 40), se puede notar una escasa dispersión de este valor en el intervalo de [0,1]. Hay una gran cantidad de estaciones que tienen un coeficiente de agrupamiento cercano a 0, lo cual se debe a que solo están conectadas a una o dos estaciones. También se observa un número reducido de nodos con un coeficiente de agrupamiento más alejado de 0, lo que indica que sus estaciones vecinas están conectadas entre sí.

Esto se debe a que los nodos más grandes están conectados con estaciones que están bastante cercanas entre sí, en cambio, los nodos que operan en rutas lejanas o de media distancia tienen menores posibilidades de que sus estaciones vecinas estén también interconectadas.

Figura 40 - Distribución Clustering.



4.4.6. Modularidad

Se han realizado tres estudios de modularidad con factores de resolución de 1.5, 1 y 0.5, obteniendo menos comunidades (11, 13 y 16 comunidades, respectivamente) a medida que aumenta el factor.

- Con un factor de 1, la modularidad aumenta a 0.765 y se forman 13 comunidades (ver Figura 41), con tamaños que varían desde 3 hasta 14 nodos.
- Para un factor de resolución de 0.5, la modularidad es 0.326, y se forman 16 comunidades (ver Figura 42). La modularidad disminuye y no se logran grupos más significativos.
- Para un factor de 1.5, la modularidad es 1.218 y se forman 11 comunidades (ver Figura 43). Al aumentar la modularidad y ser las comunidades más equilibradas en tamaño, el resultado es el más representativo.

Figura 41 - Modularidad Factor 1.

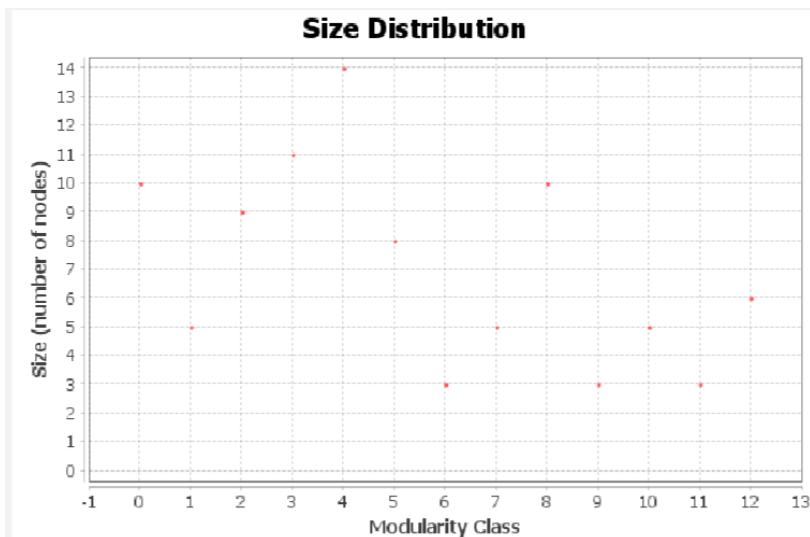


Figura 42 - Modularidad Factor 0.5.

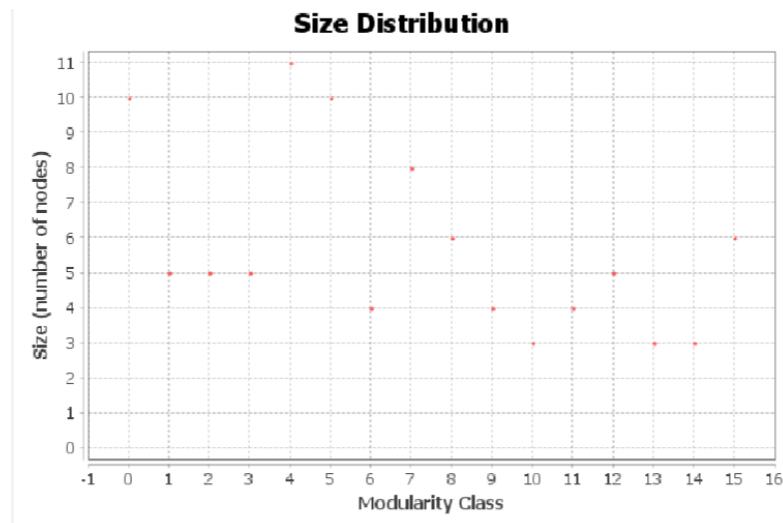
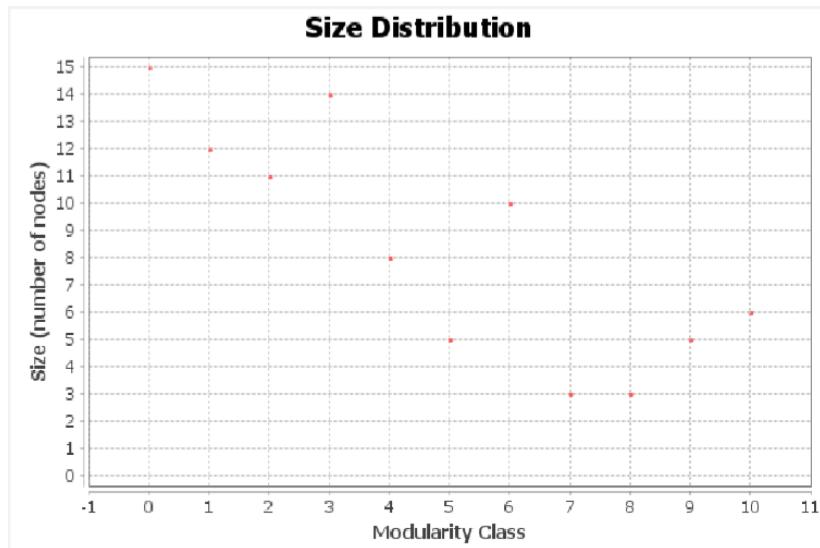


Figura 43 - Modularidad Factor 1.5.



4.4.7. PageRank

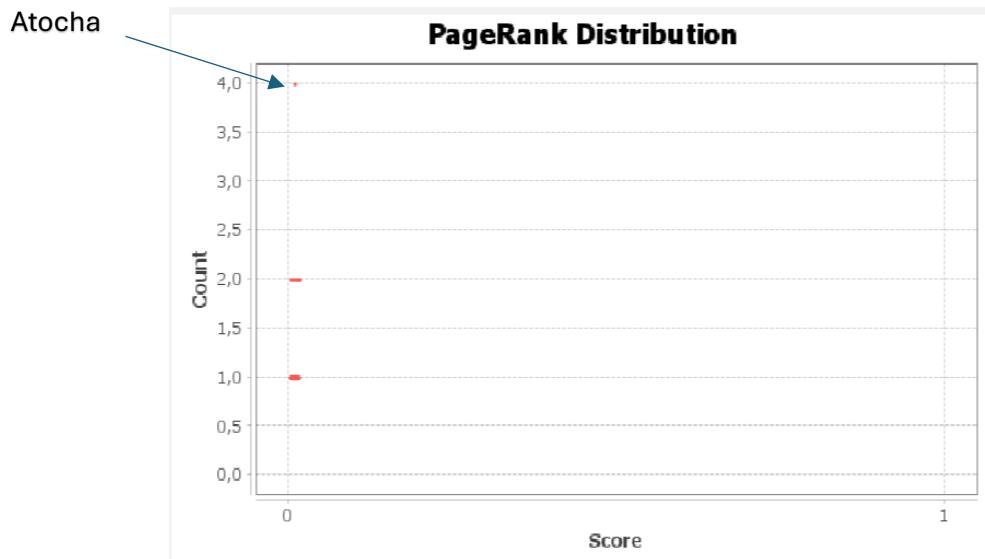
Un nodo con muchas rutas que conectan con otros nodos importantes o muy conectados tendría un mayor PageRank. La estación más relevante es Atocha, seguido de Nuevos Ministerios y Chamartín. La diferencia entre Atocha y los siguientes en el ranking de PageRank es de un 50%, con un valor de 4 frente a 2 en el siguiente escalón de la gráfica. Estas diferencias se pueden ver en la distribución asociada, donde el nodo de Atocha destaca en la zona superior (ver Figura 44).

En la red se observa que, además de otorgar importancia a los nodos con más conexiones, también se destacan aquellos con un grado intermedio, en la distribución con valor de 2, siendo los asociados a las conexiones intermedias de grado entre 6 y 10

(Chamartín, Recoletos o Nuevos Ministerios). Estos nodos son clave para acceder a ciertos grupos de la red, ya que hacen de enlace hacia líneas en puntos del extrarradio.

Por último, las estaciones asignadas al escalón más bajo de la distribución representan aquellas con una conexión más baja.

Figura 44 - Distribución PageRank.



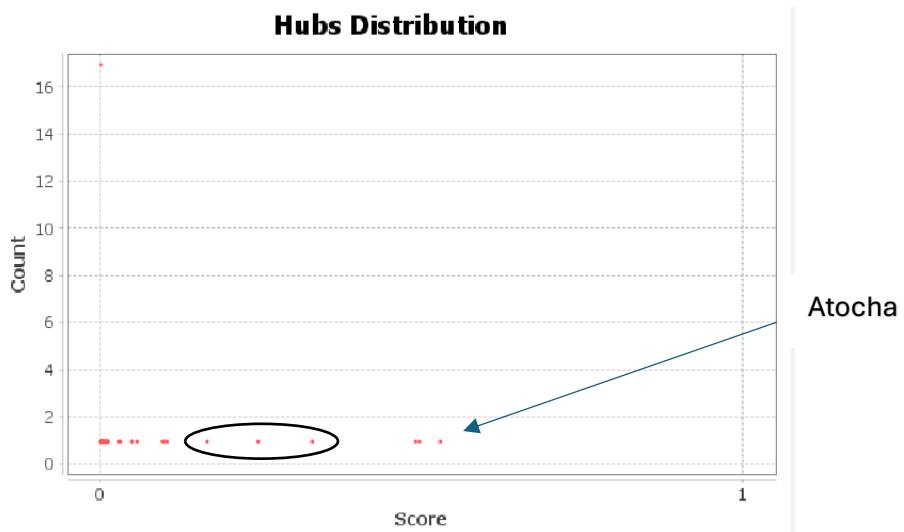
4.4.8. HUBS

El análisis de los hubs, estaciones que actúan como nodos de alta conectividad y que agrupan flujos importantes de pasajeros. Las estaciones como Atocha y Chamartín son ejemplos claros de hubs que necesitan mantener una infraestructura robusta y un sistema de gestión eficiente, ya que manejan un volumen significativo de pasajeros que transitan entre líneas. Identificar estos hubs permite priorizar inversiones en la infraestructura de la red, como la ampliación de plataformas o la mejora de los sistemas de señalización, para mejorar la capacidad y la calidad del servicio.

La estación más destacada en cuanto a relevancia es Atocha, seguida de Chamartín y Nuevos Ministerios (ver Figura 45). Lo que llama la atención es la posición de las estaciones siguientes a Atocha, Sol, Méndez Álvaro y Recoletos, ya que no había estado en los primeros lugares en las métricas previas.

La razón principal de este cambio de posiciones es que los nodos que han obtenido mejor puntuación son aquellos que no solo tienen muchos vecinos directos, sino también aquellos que son difíciles de alcanzar desde otras estaciones. Esto ocurre porque esas rutas hacia ese nodo son cruciales para conectar otras partes de la red, ganan importancia aquellas estaciones que hacen de primera para en las líneas salientes de la estación con mayor grado como Recoletos (conexión con líneas C-2 y C-8), Méndez Álvaro (conexión con líneas C-5 y C-6) y Sol (conexión con líneas C-4 y C-3). Por otro lado, en este nivel se siguen manteniendo las estaciones Nuevos Ministerios y Chamartín al ser relevantes en el tránsito de varias líneas.

Figura 45 – HUBS.



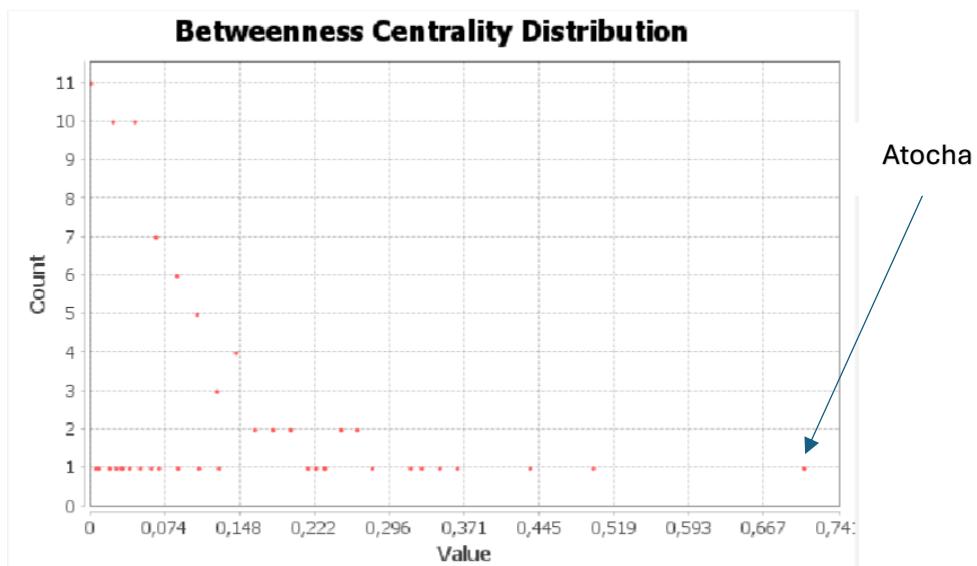
4.4.9. Centralidad Betweenness

La centralidad, en sus diversas formas, también es relevante de estudio en la red de Cercanías de Madrid. Las estaciones más centrales tienen muchas conexiones cumpliendo una función estratégica en la organización de la red, facilitando los desplazamientos y reduciendo los tiempos de transferencia. La centralidad también permite identificar posibles puntos débiles en la red que podrían necesitar refuerzo en infraestructura o servicios para la mejora del flujo de la red.

Según la centralidad de betweenness, la estación mejor posicionada es Atocha con un valor normalizado de 0.706, seguida por Chamartín con un valor de 0.497 y de Nuevos Ministerios con 0.434. Estos nodos son los que se encuentran más a la derecha, con un agrupamiento entorno a la mediana de 0,148 se puede destacar que alcanza valores muy superiores en la distribución de la centralidad de betweenness (ver Figura 46) y siendo Atocha el nodo con mayor valoración, prácticamente doblando el valor del anterior (Chamartín). El listado completo con los valores de betweenness de todas las estaciones está disponible en el Anexo 3.

La mayoría de las estaciones tienen valores de *betweenness* muy bajos, lo que significa que no son críticas para el flujo general de la red, las estaciones de fin de línea alcanzan valores de 0 en la escala. Se puede observar los nodos, se distribuyen en la zona de menores valores de manera creciente casi equidistante. Esto se debe a que la distribución de la red se agrupa en círculos concéntricos lo que hace que los nodos tengan un comportamiento radial y las estaciones se alejen a un ritmo similar. A pesar de estar normalizada, sigue existiendo una gran diferencia entre los nodos mejor clasificados y el resto.

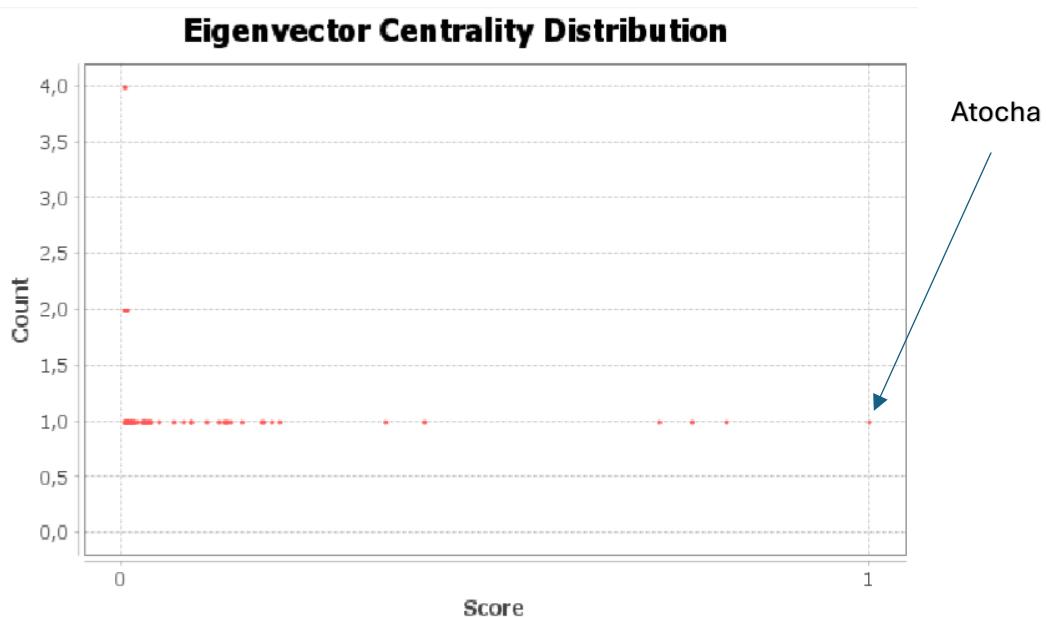
Figura 46 - Betweenness Centrality.



4.4.10. Centralidad Eigenvector

La mayoría de las estaciones tienen valores bajos, lo que significa que muchas están conectadas con nodos menos influyentes. Según la centralidad eigenvector, la estación con la mejor calidad de enlaces con sus vecinos es Atocha, seguida por Chamartín y Nuevos Ministerios, ya que están conectadas con muchas estaciones centrales. En la distribución de la centralidad eigenvector (ver Figura 47), se puede ver que, a medida que mejora la conectividad, la densidad de la dispersión disminuye extremadamente. Esto refleja cómo las estaciones más centrales tienen una mayor calidad en sus enlaces, mientras que las estaciones más periféricas tienen conexiones más limitadas.

Figura 47 - Eigenvector Centrality.



4.5. Robustez general

El análisis de la vulnerabilidad y resiliencia de las redes de transporte, especialmente de la red ferroviaria, tiene interés ya que la interrupción del servicio impacta negativamente las áreas urbanas causando graves daños económicos. En el caso del servicio ferroviario de cercanías de Madrid, según el Consorcio Regional de Transportes de Madrid, durante 2024 habrían registrado un total de 1.024 incidencias en la red de Cercanías. La línea C-4 habría registrado un total de 224 incidencias. A ella le seguiría la C-3, que conecta Aranjuez con Chamartín o El Escorial, con 164. Algo más atrás se encuentran la C-8, Guadalajara-Cercedilla, con 131 incidencias y la C-5, con 104 (Caro, I., 2025).

Siguiendo la metodología aplicada en estudios previos sobre redes de metro (Wang, 2017), se han calculado, a partir de los datos obtenidos en el estudio de Gephi, diez métricas que reflejan distintos aspectos de la robustez estructural de la red de cercanías de Madrid. Los valores obtenidos para la red de Cercanías Madrid se muestran en la Tabla 5. Cada una de estas métricas ha sido normalizada en un rango entre 0 y 1, aplicando la fórmula estándar de escalado [14]:

$$x' = \frac{x - xmin}{xmax - xmin} \quad [14]$$

donde x es el valor original de la métrica, xmin y xmax representan los valores mínimo y máximo dentro del conjunto de redes analizadas

Tabla 5 - Valores estudio robustez red cercanías. Fuente - Elaboración propia

	Valores calculados	Valores Normalizados
Grado medio (ED)	0,034	0
Conectividad natural (ConNat)	0,221	0,8
Diversidad (k)	0,325	0,6
Robustez (Rt)	0,043	0,4
Clustering (CCG)	0,031	0,2
Meshedness (MG)	0,285	0,1
Conductividad (CG)	0,010	0,1
Fiabilidad (RelG)	0,986	0,5
Eficiencia (Ef)	0,105	0,2
Conectividad algebraica (ConAlg)	0,010	0

Para representar de manera visual la robustez de una red, se ha optado por utilizar diagramas de radar, también conocidos como gráficos de araña o estrella. Estos diagramas permiten comparar múltiples métricas a la vez, ofreciendo una visión clara del desempeño global de una red de transporte y asegurando que cada métrica tenga el mismo peso en la evaluación global (ver Figura 48).

El análisis gráfico de estos valores permite comparar la estructura de la red de Cercanías Madrid con otros sistemas ferroviarios urbanos analizados por Wang (2017). En particular, su configuración muestra ciertas similitudes con la red de metro de Washington D.C., debido a la distribución de estaciones y a la extensión de sus líneas (ver Figura 49). Sin embargo, existen diferencias clave: mientras que un metro tiende a

presentar una mayor densidad de conexiones en un área reducida, la red de Cercanías se extiende sobre un territorio más amplio, lo que influye en métricas como la conectividad y la eficiencia.

Uno de los aspectos que destaca en el análisis es la alta diversidad de la red de cercanías de Madrid, lo que implica una mayor redundancia en las rutas y una menor vulnerabilidad ante fallos puntuales. Esto se debe a la presencia de múltiples líneas que coinciden en determinados tramos, creando alternativas de recorrido. Además, la conectividad natural es elevada, reflejando el diseño en estrella de la red, donde varias líneas confluyen en nodos principales como Atocha y Chamartín.

En términos de evolución futura, un modelo a seguir podría ser la red de Tokio, que destaca en métricas como la robustez y la diversidad gracias a su inversión en digitalización y optimización operativa (ver Figura 49). Aunque algunas características, como el clustering y el meshedness, están más limitadas por la geografía y el tipo de red, la aplicación de estrategias de digitalización permitiría mejorar la fiabilidad y la eficiencia operativa de la red de Cercanías Madrid.

Figura 48 - Gráfico Robustez Cercanías Madrid.

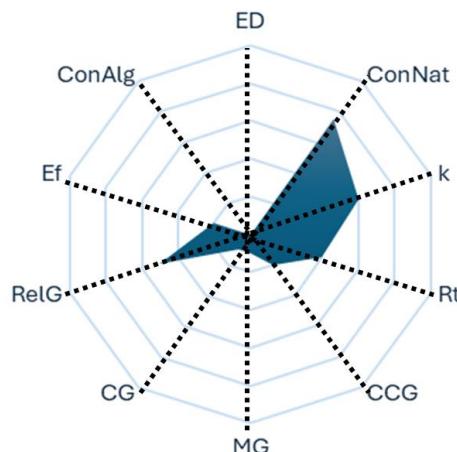
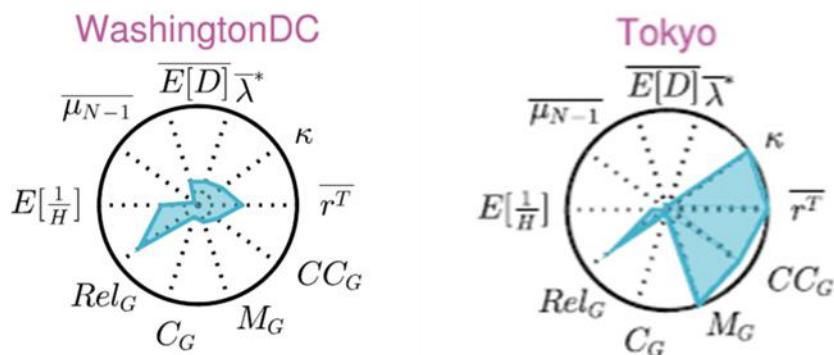


Figura 49 - Gráfico Robustez Metro Washington DC y de Tokio. Fuente: Wang (2017)



5. Estudio económico y de sostenibilidad

5.1. Estudio económico

Los costes que han tenido lugar durante su desarrollo se pueden dividir en dos grupos:

Costes Directos:

- Costes de personal
- Costes de material amortizable
- Costes de material no amortizable

Costes Indirectos:

- Consumo energético
- Gastos de administración
- Gastos de transporte

5.1.1. Costes directos

5.1.1.1. Costes de personal

El proyecto ha sido elaborado por un ingeniero, cuyas tareas han sido:

- Análisis del proyecto.
- Investigación sobre la red ferroviaria de Cercanías Madrid.
- Validación y optimización del modelo generado, contrastando los resultados con estudios previos y bases de datos ferroviarias.
- Estudio de la metodología de evaluación de robustez en infraestructuras de transporte
- Elaboración de informes y material de apoyo.

Para calcular el coste que implica la contratación del ingeniero, calcularemos primero el coste anual del mismo para, posteriormente, adecuarlo al número de horas dedicadas al proyecto. En la *Tabla 6* se muestra el coste anual:

Tabla 6 - Coste anual de personal. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO ¹	CANTIDAD €
Sueldo bruto (Ingenieros y Licenciados. Personal de alta dirección no incluido en el artículo 1.3.c del Estatuto de los Trabajadores).	23.148,00
Seguridad social: (28,30% Salario Bruto)	6550,80
Contingencias Comunes: 23,60%	
Contrato duración determinada a tiempo completo.	
Desempleo 6,70%	
Fogasa 0,20%	
Formación profesional 0,60%	
TOTAL	29.698,80

¹ Datos del Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Ley 17/2012. Bases y tipos de cotización para el año 2025. (Grupo de cotización 1 – Ingenieros y Licenciados).

A continuación, observamos la *Tabla 7* que almacena el número de días efectivos trabajados a lo largo de un año:

Tabla 7 - Días efectivos. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO	DÍAS
Año medio	365,25
Fines de semana	104,36
Días festivos reconocidos	15,00
Día de vacaciones	20,00
Días perdidos	15,00
TOTAL	210,89

Trabajando a una razón de 8 horas diarias tendremos:

$$210,89 \cdot 8 \text{ h} = 1.687,12 \text{ h anuales}$$

Por lo que la hora de trabajo en el proyecto se valora a:

$$29.698,80/1.687,12 = 17,60 \text{ €/h}$$

En la *Tabla 8* tenemos la división de horas dedicadas a cada fase del proyecto. Dado que se han dedicado 290 horas tendremos que el coste directo del ingeniero será:

$$290 \text{ h} \cdot 17,60 \text{ €/h} = 5.104,95 \text{ €}$$

Tabla 8 - Total horas dedicadas. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO	HORAS
Análisis del Proyecto	10,00
Investigación sobre la red ferroviaria de Cercanías Madrid	50,00
Validación y optimización del modelo generado, contrastando los resultados con estudios previos y bases de datos ferroviarias	90,00
Estudio de la metodología de evaluación de robustez en infraestructuras de transporte	40,00
Elaboración de informes y material de apoyo	100,00
TOTAL	290,00

5.1.1.2. Costes de material amortizable

En este apartado se incluirán todos aquellos costes provenientes de los materiales susceptibles de amortización que hemos empleado en el desarrollo del presente proyecto.

En la *Tabla 9* mostramos los costes de los equipos informáticos, del software y del material que ha sido necesario en la realización del presente proyecto.

Se considera un modelo de amortización lineal. El coste anual de los equipos amortizables es el resultado de dividir el coste de la inversión inicial entre el tiempo de amortización legalmente autorizado para cada elemento.

Tabla 9 - Coste material amortizable. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO	INVERSIÓN €	AÑOS DE AMORTIZACIÓN	COSTE ANUAL (€ / AÑO)
Portátil MSI GS73 7RE, i7, 16 GB, 1 TB HDD	1.120,00	5	224,00
Impresora HP ENVY	170,00	5	34,00
Microsoft Windows 11 Home	145,00	3	48,33
Microsoft Office 365	99,00	1	99,00
Software Gephi	0,00		0,00
Copyright	36,00	3	12,00
TOTAL	1.570,00		417,33

5.1.1.3. Costes de material no amortizable

En este apartado incluiremos los elementos que aparecen en la *Tabla 10*, denominados consumibles, donde se encuentran el papel de la impresora, material de escritorio, photocopias de la documentación, etc. Este grupo de materiales es necesario para la realización de diferentes tareas, tanto en el desarrollo del proyecto como en la edición (por ejemplo, impresión de listados y tablas, almacenar programas y documentos, etc).

Tabla 10 - Coste material consumible. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO	CANTIDAD €
Papel	14,00
Fotocopias e impresiones	20,00
Material de escritorio	15,00
Soportes Informáticos	30,00
TOTAL	79,00

Así pues, tenemos que el valor total del material no amortizable asciende a 79 €.

5.1.1.4. Costes directos totales

Reuniendo todos los gastos anteriormente expuestos se puede deducir que los costes directos totales resultan ser los que aparecen en la *Tabla 11*:

Tabla 11 Costes directos. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO	CANTIDAD €
Coste de personal	4.714,30
Coste de materiales amortizables	405,33 €
Coste de materiales no amortizables	79,00 €
TOTAL	5.198,63

5.1.2. Costes indirectos

Se consideran costes indirectos todos aquellos gastos producidos por la elaboración del proyecto y que no se pueden incluir en ninguno de los apartados anteriores. Estos se incluyen en la *Tabla 12*:

Tabla 12 - Costes indirectos. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO	CANTIDAD €
Coste energético	106,00
Teléfono e internet	100,00
Dirección y servicios administrativos	0,00
Transporte	2,00
TOTAL	226,00

5.1.3. Costes totales y precio de venta

En la *Tabla 13* se resumen todos los costes analizados anteriormente:

Tabla 13 - Costes Totales. Fuente - Elaboración propia

CONCEPTO	CANTIDAD €
Costes directos	5.198,63
Costes indirectos	226,00
TOTAL	5424,63

Precio de venta opción “A”

Finalmente calculamos el precio de venta del producto. Para ello tomamos un beneficio industrial del 15%.

Se obtiene: 6.238,32 €

Le añadimos el 21% de IVA al valor anterior de forma que obtenemos el precio de venta:

7.524,37 €

5.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En los últimos años, la movilidad urbana ha pasado de ser un simple medio para desplazarse a convertirse en un factor determinante en la calidad de vida de las personas. Y ahí es donde entra en juego la Red de Cercanías de Madrid, un sistema de transporte que conecta a miles de personas con sus lugares de trabajo, estudio o actividades diarias, reduciendo la congestión en las carreteras y ofreciendo una alternativa más sostenible frente al uso del coche privado.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son 17 metas globales establecidas por la ONU para erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos antes de 2030. Incluyen aspectos como la igualdad, el acceso a recursos básicos, la acción climática y el desarrollo sostenible (ver Figura 50). Cada ODS abarca diferentes áreas como educación, energía, infraestructura o crecimiento económico, promoviendo soluciones equitativas y sostenibles. Son un marco clave para gobiernos, empresas y ciudadanos en la construcción de un futuro más justo y sostenible. En el caso de la Red de Cercanías de Madrid, su contribución a estos objetivos es evidente, aunque todavía hay mucho margen de mejora (Naciones Unidas, 2025).

Figura 50- Representación ODS. Fuente: Naciones Unidas



El servicio de Cercanías de Madrid contribuye al ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, al facilitar una movilidad accesible y sostenible, reduciendo la congestión vehicular y las emisiones contaminantes en la ciudad. La red promueve el transporte público como alternativa al automóvil y ayuda a mejorar la conexión social al garantizar que más personas puedan desplazarse de manera asequible. La modernización de infraestructuras y trenes también optimiza la calidad del servicio, haciéndolo más sostenible e inclusivo.

El servicio de Cercanías de Madrid contribuye al ODS 13: Acción por el Clima al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al ofrecer una alternativa más limpia frente al uso del coche. Al ser un medio de transporte electrificado en gran parte de su red, disminuye la dependencia de combustibles fósiles y favorece la eficiencia energética. Además, fomenta un modelo de movilidad sostenible, reduciendo la contaminación urbana y mejorando la calidad del aire, lo que lo convierte en una figura clave en la lucha contra el cambio climático.

Por otro lado, impulsa el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura al fortalecer la infraestructura ferroviaria y modernizar el transporte público invirtiendo en digitalización, señalización avanzada y trenes más eficientes mejora la calidad del servicio y su sostenibilidad. Además, fomenta la innovación con la implementación de tecnologías como el Big Data para optimizar rutas y tiempos de viaje, y así poder conectarse con otras redes de transporte facilitando la movilidad y promoviendo un sistema de infraestructuras más accesible

ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico, al facilitar el acceso a empleos, reduciendo los tiempos de desplazamiento y mejorando la calidad de vida de los trabajadores, permite a miles de personas llegar a sus puestos de trabajo de manera eficiente, impulsando la productividad y el crecimiento económico. Además, la modernización de la red genera empleo en sectores como la ingeniería, la construcción y la tecnología ferroviaria, el desarrollo de nuevas infraestructuras y la mejora de las existentes pueden generar aún más empleo, tanto de forma directa como indirecta. La ampliación de líneas, la renovación de material rodante o la adaptación de estaciones son proyectos que requieren inversión y generan actividad económica.

Aporta también al ODS 3: Salud y Bienestar al reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire, disminuyendo enfermedades respiratorias y cardiovasculares, también reduce la congestión del tráfico y el estrés asociado a los desplazamientos en coche, favoreciendo la salud mental. La accesibilidad a centros de salud y hospitales se ve facilitada, permitiendo un mejor acceso a la atención médica y, además, fomenta un estilo de vida más activo al incentivar desplazamientos a pie hasta las estaciones evitando coger el coche en la puerta de casa.

Un objetivo en el que se podría profundizar más es el ODS 10: Reducción de las Desigualdades. Un sistema de transporte realmente eficiente es aquel que puede ser utilizado por todos, el sistema de Cercanías de Madrid ha mejorado mucho en accesibilidad en los últimos años, pero todavía hay estaciones que no cuentan con ascensores o rampas adecuadas. Garantizar que cualquier persona, independientemente de su movilidad, pueda usar el tren sin barreras es fundamental para reducir desigualdades. También, los precios de los billetes y abonos también son importantes en la equidad del sistema. Mantener tarifas accesibles para estudiantes, personas mayores y colectivos vulnerables es una forma de garantizar que el transporte público siga siendo una opción viable para todos.

Como conclusión, la red de Cercanías Madrid tiene un papel fundamental en el desarrollo sostenible de la ciudad, ya que contribuye a muchos de los ODS, pero con mejoras en campos como la accesibilidad, su impacto podría ser aún mayor convirtiéndose en un modelo de movilidad igualitario para todas las personas para el futuro.

6. Conclusiones y extensiones

6.1. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado la red ferroviaria de cercanías de Madrid mediante la teoría de grafos. El estudio de las propiedades de la red de Cercanías de Madrid ha permitido comprender las características estructurales de la red. La robustez general ha permitido evaluar la resiliencia de la red ante escenarios de estrés, como fallos en infraestructuras o incrementos abruptos en la demanda. Se ha comprobado que la red de Cercanías de Madrid presenta una estructura relativamente resistente, aunque con vulnerabilidades en determinadas líneas y estaciones de alta concurrencia. La identificación de estos puntos críticos es fundamental para establecer estrategias de mitigación que garanticen la continuidad del servicio y la optimización de los flujos de pasajeros.

A partir de estas observaciones, se extraen una serie de conclusiones sobre la red de Cercanías en Madrid:

6.1.1. Optimización de la Red y Conectividad

El estudio de las propiedades de la red de Cercanías de Madrid revela que estaciones como Atocha y Chamartín actúan como nodos altamente conectados con un papel fundamental en la distribución del flujo de pasajeros. La alta centralidad betweenness de estas estaciones sugiere la necesidad de reforzar su capacidad y eficiencia operativa para mitigar problemas de saturación en horas punta. Del mismo modo, los análisis de grado, densidad y clustering ponen en evidencia la existencia de zonas donde la conectividad podría optimizarse para mejorar la accesibilidad y la resiliencia de la red.

Para ello, Renfe ha identificado la digitalización como una palanca clave para su crecimiento. La implementación de Big Data, IoT e Inteligencia Artificial en la gestión de rutas y horarios permitiría mejorar la puntualidad y reducir la congestión en estaciones estratégicas. La planificación estratégica de Renfe ha comenzado a centrar esfuerzos en la implementación de sistemas avanzados de gestión del tráfico ferroviario y optimización de infraestructuras, siguiendo el ejemplo de las redes ferroviarias más avanzadas del mundo.

6.1.2. Sostenibilidad y expansión

La electrificación de líneas y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles en ciertas rutas de Cercanías resultan esenciales para alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y ayudar en la expansión internacional de Renfe en mercados como Francia y Alemania refuerza su posicionamiento global, aunque sigue dependiendo de la inversión en infraestructura ferroviaria a nivel nacional para consolidar su liderazgo en movilidad sostenible.

Por otro lado, el proceso de liberalización del sector ferroviario obliga a Renfe a fortalecer su modelo de negocio para hacer frente a nuevos operadores en el mercado, la modernización de la flota de Cercanías responde a la necesidad de mejorar la experiencia del usuario y la eficiencia del servicio.

A medida que la población de Madrid y su área metropolitana sigue creciendo, la demanda sobre estos nodos clave aumentará, lo que plantea la necesidad de implementar mejoras en la infraestructura y los sistemas de gestión de los flujos de pasajeros. Los estudios de capacidad de estas estaciones, así como el análisis de la interconexión entre ellas, serán esenciales para la planificación de futuras ampliaciones de la red, para mitigar los efectos de la congestión y para asegurar que la red de Cercanías siga siendo eficiente y capaz de dar respuesta a las demandas del transporte público, lo que también se refleja en el plan estratégico propuesto por Renfe.

6.2. Extensiones futuras

El análisis de la red de cercanías de Madrid no solo conduce a propuestas para mejorar el sistema de cercanías en Madrid, sino que también puede dar ideas útiles para otros sistemas de transporte urbano que enfrenten problemas similares. Este tipo de estudios permite identificar áreas de mejora en aspectos fundamentales para el desarrollo de infraestructuras de transporte.

Un ejemplo claro de cómo la tecnología puede revolucionar el transporte urbano es lo que está ocurriendo en Valladolid con la implementación de un gemelo digital para su red de transporte. Gracias al respaldo de la iniciativa europea SPINE, este proyecto busca crear una réplica virtual del sistema de transporte de la ciudad con el objetivo de mejorar la planificación de rutas, responder de manera más eficiente a las necesidades de los ciudadanos y reducir las emisiones de CO₂, la siniestralidad y la congestión del tráfico (El Español, 2022). Este nuevo proyecto podría beneficiarse de un estudio de la red como se ha realizado en el caso de la red de Cercanías de Madrid para llevarse a cabo de una manera más eficiente.

Además de la digitalización del transporte, otra pieza clave en la transformación de la movilidad en Valladolid es la construcción de su estación intermodal. Con una inversión de casi 300 millones de euros, busca convertir la estación en un nodo logístico de referencia en España, este consiste en una nueva infraestructura diseñada para adaptarse a los "trenes del futuro", y se espera que la estación esté plenamente operativa a mediados de 2026, lo que permitirá desviar el tráfico de mercancías fuera del centro urbano de Valladolid. La puesta en marcha de esta infraestructura no solo mejorará la eficiencia del transporte de mercancías, sino que también reducirá la congestión en el centro de la ciudad, contribuyendo a una movilidad más sostenible y eficiente (Rodríguez, 2024).

El análisis que ofrece Madrid en la gestión de su red de Cercanías puede ser muy valioso para Valladolid, como las herramientas de simulación y análisis de datos que se pueden utilizar para optimizar rutas y horarios, mejorando así la eficiencia del servicio. También, la experiencia de Madrid en la gestión de una red de transporte tan compleja puede servir como referencia para abordar desafíos como la congestión y la necesidad de soluciones más sostenibles. Invertir en tecnología avanzada y modernizar

infraestructuras, es una apuesta por un futuro en el que las ciudades sean más accesibles, habitables y respetuosas con el medioambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- ADIF. (2024). *Infraestructura ferroviaria en España*.
- Barabási A-L., Albert R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286, 509-512.
- Caro I. (2025, febrero 7). Renfe aumenta su caos: Descontrol en trenes de Cercanías y Media Distancia de Madrid. *El Cierre Digital*. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de Renfe aumenta su caos: Descontrol en trenes de Cercanías y Media Distancia de Madrid <https://elcierredigital.com/investigacion/renfe-acumula-problemas-caos-persiste-trenes-cercanias-y-media-distancia-madrid>
- Cats O., Jenelius E. (2014). Dynamic vulnerability analysis of public transport networks: Mitigation effects of real-time information, *Networks and Spatial Economics*, 14 (3-4), 435-463.
- Cats O., Jenelius E. (2015). Planning for the unexpected: The value of reserve capacity for public transport network robustness, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 47-61.
- Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) (2021). *Informe anual 2021 del sector ferroviario*. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de <https://www.cnmc.es/sites/default/files/4422238.pdf>
- Curranini S., Jackson M., Pin P. (2009). An Economic Model of Friendship: Homophily, Minorities, and Segregation. *Econometrica*, 77, 1003-10045.
- El Orden Mundial (EOM). (2024). Recuperado el 22 de marzo de 2025, de <https://elordenmundial.com>.
- El País (2025, enero 7). Raúl Blanco deja la presidencia de Renfe. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de <https://elpais.com/economia/2025-01-07/raul-blanco-deja-su-cargo-como-presidente-de-renfe.html>.
- El País (2025, enero 13). Renfe refuerza la línea C5 de Cercanías con 40,000 plazas adicionales. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de <https://elpais.com/espana/madrid/2025-01-13/renfe-refuerza-la-linea-c5-de-cercanias-con-40000-plazas-adicionales-para-mitigar-el-impacto-de-las-obras-de-la-a-5.html>
- Europa Press. (2024, enero 17). España, segundo país con más vías de alta velocidad del mundo y séptimo en número de pasajeros. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de <https://www.europapress.es/economia/transportes-00343/noticia-espana-segundo-pais-mas-vias-alta-velocidad-mundo-septimo-numero-pasajeros-20240117175359.html>
- Fernández A. (2019). La liberalización del transporte ferroviario en España. *Economía y Transporte*, 34(4), 67-89.
- García M. (2020). Estrategias de sostenibilidad en el transporte ferroviario: El caso de Renfe. *Revista Española de Movilidad Sostenible*, 12(3), 45-60.
- Gómez R. (2017). Digitalización en el transporte ferroviario: Innovaciones en Renfe. *Revista de Innovación en Transporte*, 23(5), 89-102.

Hosteltur. (s.f.). *Arranca la transformación de Renfe en cuatro años con nueva organización.* Recuperado de https://www.hosteltur.com/161177_arranca-la-transformacion-de-renfe-en-cuatro-anos-con-nueva-organizacion.html.

El Español (2022, 21 de agosto). La red de transporte urbano de Valladolid tendrá un gemelo digital para ganar en eficacia y eficiencia. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de https://www.elespanol.com/invertia/disruptores-innovadores/autonomias/castilla-leon/20220821/transporte-urbano-valladolid-gemelo-digital-eficacia-eficiencia/694930526_0.html

Jackson M. (2008). *Social and Economic Networks*. Princeton University Press

Kim H., Kim C., Chun Y. (2015). Network reliability and resilience of rapid transit systems, *The Professional Geographer*, 6, 1–13.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021). *Informe 2021: Observatorio del ferrocarril en España*. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/ferroviario/observatorio/ofe_2021_feb2023_v2.pdf

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2022). *Informe anual 2022*. Gobierno de España. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/ferroviario/observatorio/ofe_2022_feb2024_v3.3_prot.pdf

Newman M. (2003). *The structure and function of complex networks*. Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, U.S.A.

Newman M. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford University Press.

Porter M., Onnela J-P., Mucha P. (2009). Communities in Networks. Online. Fuente: <http://arxiv.org/pdf/0902.3788v2.pdf>

Renfe. (s.f.). Conócenos: Grupo Renfe. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/conocenos/la-empresa>

Renfe. (s.f.). Plan estratégico 2028.

Rodríguez J., Pérez L. (2018). El impacto de la alta velocidad ferroviaria en la economía española. *Revista de Infraestructuras*, 45(2), 125-140.

Rodríguez M. (2024, 16 de septiembre). El complejo ferroviario estará operativo a mediados de 2026. *El Día de Valladolid*. Recuperado el 22 de marzo de 2025, de <https://www.eldiadevalladolid.com/noticia/zc93881cc-add7-10da-fae9f53fdbab3e3/202409/la-estacion-intermodal-estara-operativa-a-mediados-de-2026>

Rodríguez-Núñez E., García-Palomares J.C. (2014). Measuring the vulnerability of public transport networks, *Journal of Transport Geography*, 35 (0) 50–63.

Táboas I. (2019). La liberalización del mercado ferroviario y el Plan Estratégico de RENFE, *Economistas*, 164, 16-24.

Wang X., Koç Y., Derrible S., Ahmad S.N., Kooij R.E. (2015). Quantifying the robustness of metro networks, in: *6th International Symposium on Transportation Network Reliability*, Nara, Japan.

Wang X., Koç Y., Derrible S., Ahmad S. N., Kooij R. E. (2017). Multi-criteria robustness analysis of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 474, 19-31.

Anexo 1. Gráfico Nodos Gephi

Este anexo contiene una tabla con nodos que alimenta a Gephi para generar la red Cercanías de Madrid. Se ha adjuntado en formato Excel para facilitar su consulta y análisis. La columna weight recoge el número de pasajeros que entran y salen de la estación en hora punta.

Id	Label	Latitude	Longitude	Weight
10000	MADRID-PRINCIPE PIO	40.421.389	-3.718.968	1991
10001	ARAVACA	40.448.345	-3.786.191	983
10002	POZUELO	40.447.225	-3.800.145	750
10005	LAS ROZAS	40.494.215	-3.868.181	791
10007	MAJADAHONDA	40.474.347	-3.845.334	701
10010	EL BARRIAL-CENTRO COMERCIAL-POZUELO	40.465.299	-3.807.828	435
10100	PINAR DE LAS ROZAS	40.522.282	-3.882.258	535
10101	LAS MATAS	40.552.415	-3.896.791	452
10103	TORRELODONES	40.574.559	-3.956.577	189
10104	GALAPAGAR-LA NAVATA	40.600.159	-3.981.913	191
10200	VILLALBA DE GUADARRAMA	40.626.522	-400.812	921
10201	SAN YAGO	40.617.864	-4.031.106	29
10202	LAS ZORRERAS-NAVALQUEJIGO	40.609.265	-4.046.336	91
10203	EL ESCORIAL	40.585.279	-4.132.418	264
12001	LOS NEGRALES	4.063.856	-4.021.915	3
12002	ALPEDRETE	40.658.096	-4.034.996	30
12004	COLLADO MEDIANO	40.692.757	-4.035.894	36
12005	LOS MOLINOS-GUADARRAMA	40.706.598	-4.067.179	14
12006	CERCEDILLA	40.737.516	-4.066.481	24
17000	MADRID-CHAMARTIN	404.732.797	-36.818.974	7099
17001	FUENCARRAL	405.024.656	-36.817.503	551
17003	EL GOLOSO	40.558.808	-3.713.966	30
17004	TRES CANTOS	40.598.596	-37.156	1317
17005	COLMENAR VIEJO	40.645.211	-3.776.617	812
17009	UNIVERSIDAD-CANTOBLANCO	40.543.818	-3.700.217	956
18000	MADRID-ATOCHA CERCANIAS	40.406.556	-3.689.508	21775
18001	MADRID-RECOLETOS	40.423.371	-3.690.995	2092
18002	MADRID-NUEVOS MINISTERIOS	40.446.612	-3.692.207	9428
18003	MENDEZ ALVARO	40.395.419	-3.678.137	3694
18004	DELICIAS	40.400.381	-3.692.712	817
18005	PIRAMIDES	40.402.516	-3.711.374	1538
18101	SOL	40.416.856	-3.702.904	4234
19001	UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS	4.055.412	-3.683.267	177
19002	VALDELASFUENTES	40.547.425	-3.654.149	1430
19003	ALCOBENDAS SAN SEBASTIAN DE LOS REYES	40.546.744	-3.635.149	512
35001	LEGANES	40.328.633	-3.771.162	1508
35002	FUENLABRADA	40.283.135	-3.799.565	2173
35009	ZARZAQUEMADA	403.409.732	-37.482.259	1413
35010	LA SERNA-FUENLABRADA	40.296.725	-3.792.477	1202
35011	PARQUE POLVORANCA	40.312.544	-3.783.546	524
35012	HUMANES	40.255.565	-3.828.334	307
35600	ALUCHE	40.385.738	-3.760.807	2367
35601	FANJUL	4.038.367	-3.768.496	448
35602	LAS AGUILAS	40.381.009	-3.780.187	663
35603	CUATRO VIENTOS	40.377.714	-3.791.574	837

35604	SAN JOSE DE VALDERAS	40.356.574	-3.815.577	604
35605	ALCORCON	40.350.199	-3.831.678	1212
35606	MOSTOLES	40.328.724	-3.863.478	1900
35607	MOSTOLES-EL SOTO	40.330.971	-3.882.441	565
35608	LAGUNA	40.399.006	-3.744.225	1042
35609	EMBAJADORES	40.404.609	-3.702.592	2062
35610	LAS RETAMAS	40.341.869	-3.842.311	726
35702	DOCE DE OCTUBRE	40.379.224	-3.698.976	599
35703	ORCASITAS	40.367.081	-3.704.244	603
35704	PUENTE ALCOCER	40.350.418	-3.705.122	788
37001	VILLAVERDE ALTO	40.341.622	-3.712.565	2760
37002	GETAFE-CENTRO	40.309.974	-3.733.989	1997
37010	LAS MARGARITAS	40.323.041	-3.727.278	962
37011	GETAFE-SECTOR 3	40.288.252	-3.737.529	328
37012	PARLA	40.241.032	-3.769.312	2350
60100	VILLAVERDE BAJO	403.555.397	-36.832.514	1719
60101	SAN CRISTOBAL INDUSTRIAL	403.320.318	-36.963.666	114
60102	GETAFE-INDUSTRIAL	403.055.338	-37.073.714	147
60103	PINTO	402.429.829	-37.036.534	560
60104	VALDEMORO	401.958.184	-36.646.737	1064
60105	CIEMPOZUELOS	401.590.641	-3.610.221	387
60107	SAN CRISTOBAL DE LOS ANGELES	403.419.854	-3.683.232	261
60109	EL CASAR	403.184.029	-37.092.335	914
60200	ARANJUEZ	400.347.255	-36.182.069	557
70002	ASAMBLEA DE MADRID-ENTREVIAS	403.814.976	-3.667.215	1717
70003	EL POZO	403.765.168	-36.564.132	1371
70001	VALLECAS	40.382.264	-3.624.931	2155
70100	VICALVARO	40.401.043	-35.952.733	1428
70101	SAN FERNANDO DE HENARES	404.424.319	-35.342.411	419
70102	TORREJON DE ARDOZ	404.547.456	-34.797.065	1571
70103	ALCALA DE HENARES	40.488.976	-33.664.702	1871
70104	MECO	40.534.668	-32.985.719	88
70105	AZUQUECA	4.056.104	-3.265.446	485
70107	ALCALA DE HENARES-UNIVERSIDAD	405.054.503	-33.353.684	245
70108	COSLADA	404.241.947	-35.602.359	1857
70109	SANTA EUGENIA	403.877.971	-36.087.501	688
70111	LA GARENA	404.807.624	-33.919.677	602
70112	SOTO DEL HENARES	40.464.383	-3.440.614	609
70200	GUADALAJARA	40.534.668	-32.985.719	674
97100	PITIS	404.956.316	-37.256.015	399
97201	RAMON Y CAJAL	404.880.223	-36.935.145	1351
98003	FUENTE DE LA MORA	40.484.729	-3.662.833	954
98304	VALDEBEBAS	4.048.207	-3.616.414	120
98305	AEROPUERTO T-4	40.491.691	-3.593.988	160

Anexo 2. Gráfico Aristas Gephi

Este anexo contiene una tabla con nodos que alimenta a Gephi para la red Cercanías de Madrid. Se ha adjuntado en formato Excel para facilitar su consulta y análisis.

Source	Target	Type	Id	Label	Weight	Linea
98305	98304	Undirected	0	1	1	1
98304	98003	Undirected	1	1	1	1
98003	17000	Undirected	2	1	1	1
70200	70105	Undirected	3	2	1	2
70105	70104	Undirected	4	2	1	2
70104	70107	Undirected	6	2	1	2
70107	70103	Undirected	7	2	1	2
70103	70111	Undirected	8	2	1	2
70111	70112	Undirected	9	2	1	2
70112	70102	Undirected	10	2	1	2
70102	70101	Undirected	11	2	1	2
70101	70108	Undirected	12	2	1	2
70108	70100	Undirected	13	2	1	2
70100	70109	Undirected	14	2	1	2
70109	70001	Undirected	15	2	1	2
70001	70003	Undirected	16	2	1	2
70003	70002	Undirected	17	2	1	2
70002	18000	Undirected	18	2	1	2
18000	18001	Undirected	19	2	1	2
18001	18002	Undirected	20	2	1	2
18002	17000	Undirected	21	2	1	2
60200	60105	Undirected	22	3	1	3
60105	60104	Undirected	23	3	1	3
60104	60103	Undirected	24	3	1	3
60103	60102	Undirected	25	3	1	3
60102	60109	Undirected	26	3	1	3
60109	60101	Undirected	27	3	1	3
60101	60107	Undirected	28	3	1	3
60107	60100	Undirected	29	3	1	3
60100	18000	Undirected	30	3	1	3
18000	18101	Undirected	31	3	1	3
18101	18002	Undirected	32	3	1	3
18002	17000	Undirected	33	3	1	3
37012	37011	Undirected	34	4	1	4
37011	37002	Undirected	35	4	1	4
37002	37010	Undirected	36	4	1	4
37010	37001	Undirected	37	4	1	4
37001	60100	Undirected	38	4	1	4
60100	18000	Undirected	39	4	1	4
18000	18101	Undirected	40	4	1	4
18101	18002	Undirected	41	4	1	4
18002	17000	Undirected	43	4	1	4
17000	17001	Undirected	44	4	1	4
17001	17009	Undirected	45	4	1	4
35607	35606	Undirected	46	5	1	5
35606	35610	Undirected	47	5	1	5
35610	35605	Undirected	48	5	1	5
35605	35604	Undirected	49	5	1	5
35604	35603	Undirected	50	5	1	5
35603	35602	Undirected	51	5	1	5

35602	35600	Undirected	52	5	1	5
35600	35608	Undirected	53	5	1	5
35608	35609	Undirected	54	5	1	5
35609	18000	Undirected	55	5	1	5
18000	18003	Undirected	56	5	1	5
18003	35702	Undirected	57	5	1	5
35702	35703	Undirected	58	5	1	5
35703	35704	Undirected	59	5	1	5
35704	37001	Undirected	60	5	1	5
37001	35009	Undirected	61	5	1	5
35009	35001	Undirected	62	5	1	5
35001	35011	Undirected	63	5	1	5
35011	35010	Undirected	64	5	1	5
35010	35002	Undirected	65	5	1	5
35002	35012	Undirected	66	5	1	5
70103	70111	Undirected	67	7	1	7
70111	70112	Undirected	68	7	1	7
70112	70102	Undirected	69	7	1	7
70102	70101	Undirected	70	7	1	7
70101	70108	Undirected	71	7	1	7
70108	70100	Undirected	72	7	1	7
70100	70109	Undirected	73	7	1	7
70109	70001	Undirected	74	7	1	7
70001	70003	Undirected	75	7	1	7
70003	70002	Undirected	76	7	1	7
70002	18000	Undirected	77	7	1	7
18000	18001	Undirected	78	7	1	7
18001	18002	Undirected	79	7	1	7
18002	17000	Undirected	80	7	1	7
17000	97201	Undirected	81	7	1	7
97201	97100	Undirected	82	7	1	7
97100	10005	Undirected	83	7	1	7
10005	10010	Undirected	84	7	1	7
10010	10002	Undirected	85	7	1	7
10002	10001	Undirected	86	7	1	7
10001	10000	Undirected	87	7	1	7
70200	70105	Undirected	88	8	1	8
70105	70104	Undirected	89	8	1	8
70104	70107	Undirected	90	8	1	8
70107	70103	Undirected	91	8	1	8
70103	70111	Undirected	92	8	1	8
70111	70112	Undirected	93	8	1	8
70112	70102	Undirected	94	8	1	8
70102	70101	Undirected	95	8	1	8
70101	70108	Undirected	96	8	1	8
70108	70100	Undirected	97	8	1	8
70100	70109	Undirected	98	8	1	8
70109	70001	Undirected	99	8	1	8
70001	70003	Undirected	100	8	1	8
70003	70002	Undirected	101	8	1	8
70002	18000	Undirected	102	8	1	8
18000	18001	Undirected	103	8	1	8
18001	18002	Undirected	104	8	1	8
18002	17000	Undirected	105	8	1	8
17000	97201	Undirected	106	8	1	8
97201	97100	Undirected	107	8	1	8

97100	10100	Undirected	108	8	1	8
10100	10101	Undirected	109	8	1	8
10101	10103	Undirected	110	8	1	8
10103	10104	Undirected	111	8	1	8
10104	10200	Undirected	112	8	1	8
10200	10104	Undirected	113	10	1	10
10104	10103	Undirected	114	10	1	10
10103	10101	Undirected	115	10	1	10
10101	10100	Undirected	116	10	1	10
10100	10005	Undirected	117	10	1	10
10005	10007	Undirected	118	10	1	10
10007	10010	Undirected	119	10	1	10
10010	10002	Undirected	120	10	1	10
10002	10001	Undirected	121	10	1	10
10001	10000	Undirected	122	10	1	10
10000	18005	Undirected	123	10	1	10
18005	18004	Undirected	124	10	1	10
18004	18003	Undirected	125	10	1	10
18003	18000	Undirected	126	10	1	10
18000	18001	Undirected	127	10	1	10
18001	18002	Undirected	128	10	1	10
18002	17000	Undirected	129	10	1	10
19001	19002	Undirected	127	4	1	4
19002	19003	Undirected	128	4	1	4
17003	17004	Undirected	129	4	1	4
17004	17005	Undirected	130	4	1	4
10201	10202	Undirected	131	8	1	8
10202	10203	Undirected	132	8	1	8
10203	10204	Undirected	133	8	1	8
10204	10205	Undirected	134	8	1	8
10205	10206	Undirected	135	8	1	8
12001	12002	Undirected	136	8	1	8
12002	12004	Undirected	137	8	1	8
12004	12005	Undirected	138	8	1	8
12005	12006	Undirected	139	8	1	8
35601	35600	Undirected	141	5	1	5

Anexo 3. Centralidad y betweenness de las estaciones

Este anexo contiene las propiedades de centralidad y betweenness de la red de Cercanías de Madrid. Se ha incluido la columna del número de pasajeros en hora punta (weight)

Id	Label	Weight	Betweenness	Grado
10000	MADRID-PRINCIPE PIO	1991	0,0328	3
10001	ARAVACA	983	0,022119977	4
10002	POZUELO	750	0,012903796	4
10005	LAS ROZAS	791	0,042364286	4
10007	MAJADAHONDA	701	0	2
10010	EL BARRIAL-CENTRO COMERCIAL-POZUELO	435	0,014905788	4
10100	PINAR DE LAS ROZAS	535	0,068376068	4
10101	LAS MATAS	452	0,052014652	4
10103	TORRELODONES	189	0,035164835	4
10104	GALAPAGAR-LA NAVATA	191	0,017826618	4
10200	VILLALBA DE GUADARRAMA	921	0	2
10201	SAN YAGO	29	0	1
10202	LAS ZORRERAS-NAVALQUEJIGO	91	0,000976801	2
10203	EL ESCORIAL	264	0,001465201	2
12001	LOS NEGRALES	3	0,001465201	1
12002	ALPEDRETE	30	0,000976801	2
12004	COLLADO MEDIANO	36	0	2
12005	LOS MOLINOS-GUADARRAMA	14	0	2
12006	CERCEDILLA	24	0,000732601	1
17000	MADRID-CHAMARTIN	7099	0,000976801	10
17001	FUENCARRAL	551	0,000732601	2
17003	EL GOLOSO	30	0	1
17004	TRES CANTOS	1317	0,217013439	2
17005	COLMENAR VIEJO	812	0,017826618	1
17009	UNIVERSIDAD-CANTOBLANCO	956	0	1
18000	MADRID-ATOCHA CERCANIAS	21775	0,0002442	14
18001	MADRID-RECOLETO	2092	0	8
18002	MADRID-NUEVOS MINISTERIOS	9428	0	12
18003	MENDEZ ALVARO	3694	0,494129621	4
18004	DELICIAS	817	0,172338746	2
18005	PIRAMIDES	1538	0,210480756	2
18101	SOL	4234	0,09414365	4
19001	UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS	177	0,057033286	1
19002	VALDELASFUENTES	1430	0,044833169	2
19003	ALCOBENDAS SAN SEBASTIAN DE LOS REYES	512	0,043084686	1
35001	LEGANES	1508	0	2
35002	FUENLABRADA	2173	0,0002442	2
35009	ZARZAQUEMADA	1413	0	2
35010	LA SERNA-FUENLABRADA	1202	0,068376068	2
35011	PARQUE POLVORANCA	524	0,017826618	2
35012	HUMANES	307	0,084249084	1
35600	ALUCHE	2367	0,035164835	2
35601	FANJUL	448	0,052014652	2
35602	LAS AGUILAS	663	0	2
35603	CUATRO VIENTOS	837	0,128937729	2
35604	SAN JOSE DE VALDERAS	604	0,114529915	2

35605	ALCORCON	1212	0,0996337	2
35606	MOSTOLES	1900	0,084249084	2
35607	MOSTOLES-EL SOTO	565	0,068376068	1
35608	LAGUNA	1042	0,052014652	2
35609	EMBAJADORES	2062	0,017826618	2
35610	LAS RETAMAS	726	0	2
35702	DOCE DE OCTUBRE	599	0,142857143	2
35703	ORCASITAS	603	0,156288156	2
35704	PUENTE ALCOCER	788	0,035164835	2
37001	VILLAVERDE ALTO	2760	0,014409833	4
37002	GETAFE-CENTRO	1997	0,004641823	2
37010	LAS MARGARITAS	962	0,007570208	2
37011	GETAFE-SECTOR 3	328	0,177531559	2
37012	PARLA	2350	0,035164835	11
60100	VILLAVERDE BAJO	1719	0,052014652	4
60101	SAN CRISTOBAL INDUSTRIAL	114	0,017826618	2
60102	GETAFE-INDUSTRIAL	147	0	2
60103	PINTO	560	0,279607261	2
60104	VALDEMORO	1064	0,0996337	2
60105	CIEMPOZUELOS	387	0,068376068	2
60107	SAN CRISTOBAL DE LOS ANGELES	261	0,052014652	2
60109	EL CASAR	914	0,035164835	2
60200	ARANJUEZ	557	0,017826618	1
70002	ASAMBLEA DE MADRID-ENTREVIAS	1717	0,114529915	6
70003	EL POZO	1371	0,084249084	6
70001	VALLECAS	2155	0	2
70100	VICALVARO	1428	0,181684982	6
70101	SAN FERNANDO DE HENARES	419	0,205128205	6
70102	TORREJON DE ARDOZ	1571	0,193650794	6
70103	ALCALA DE HENARES	1871	0,156288156	5
70104	MECO	88	0,128937729	4
70105	AZUQUECA	485	0,114529915	4
70107	ALCALA DE HENARES-UNIVERSIDAD	245	0,068376068	4
70108	COSLADA	1857	0,035164835	6
70109	SANTA EUGENIA	688	0,017826618	6
70111	LA GARENA	602	0,052014652	6
70112	SOTO DEL HENARES	609	0,142857143	6
70200	GUADALAJARA	674	0,169230769	2
97100	PITIS	399	0,084249084	4
97201	RAMON Y CAJAL	1351	0,0996337	4
98003	FUENTE DE LA MORA	954	0	2
98304	VALDEBEBAS	120	0,121721293	2
98305	AEROPUERTO T-4	160	0,133921409	1

Anexo 4. Documento Gephi

Este anexo contiene el archivo generado por Gephi (GephiMadrid.gephi) con el desarrollo de la red de Cercanías de Madrid.