

# ELECTRIFICACIÓ FERROVIÀRIA

---

**LLUÍS MONJO**  
**IGNASI PERAT**

## 6.1. L'assignatura

La gestió de projectes i noves línies aborda la conceptualització de la infraestructura, els sistemes i la operació de línies ferroviàries futures per tal de determinar-ne les característiques principals i poder valorar-ne així la seva viabilitat tècnica (Profillidis, 2022). Els projectes del sector ferroviari es caracteritzen per requerir una forta inversió inicial per tal de tirar-los endavant i, per tant, és necessari analitzar en profunditat la viabilitat tècnica, econòmica i social del projecte abans de procedir a la seva construcció i posada en servei (Su i Tian, 2023).

L'assignatura de Gestió de Projectes i Noves Línies forma part del màster en Sistemes Ferroviaris i Tracció Elèctrica de la UPC School, que s'impulsa i s'imparteix a l'Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Té una càrrega lectiva de 18 hores i s'imparteix en tres sessions de 6 hores durant

els mesos de maig a juliol. L'objectiu d'aquesta assignatura és proporcionar als estudiants una visió complementària dels sistemes ferroviaris i enfocada a l'estudi dels processos i les capacitats tècniques dels projectes ferroviaris.

Al finalitzar l'assignatura s'espera que els estudiants siguin capaços de: (i) definir les dades generals del projecte ferroviari, (ii) determinar les característiques tècniques dels subsistemes ferroviaris principals, (iii) establir els criteris de disseny de la nova línia, (iv) dimensionar els elements principals del sistema i, finalment, (v) resoldre amb detall els dissenys proposats.

L'assignatura es divideix en l'anàlisi de diferents projectes reals que s'han dut a terme en els darrers anys, i es desenvolupa mitjançant diverses sessions de caràcter pràctic en les quals s'introdueixen els diferents conceptes tècnics, de presa de decisió i de gestió de noves línies de ferrocarril.

## **6.2. Justificació del treball per reptes**

En els temps actuals el mercat laboral en l'àmbit dels sistemes ferroviaris viu un moment de forta demanda, on es busquen professionals que tinguin un coneixement ampli i una visió general del món ferroviari (MAFEX, 2024). En aquest context, l'aprenentatge basat en reptes és una eina de gran importància en el currículum formatiu dels enginyers ferroviaris, ja que aporta una dosi de realitat amb projectes existents, i on la interconnexió de les diferents disciplines es posa ràpidament de manifest. L'aplicabilitat d'aquesta metodologia fomenta la participació activa de l'estudiantat i permet posar èmfasi en la interdisciplinarietat.

El repte proposat es basa en la presentació de dues noves línies de ferrocarril en projecte, on es defineixen aspectes clau com el recorregut, el nombre d'estacions, els principis operatius o el material mòbil i la senyalització. A partir d'aquí s'han de prendre decisions sobre els criteris de disseny de l'electrificació i l'anàlisi de costos de les diferents alternatives. Aquest plantejament permet que l'estudiantat aprengui a discernir sobre els pros i contres referents a aspectes tècnics, i que també pugui desenvolupar anàlisis sobre la viabilitat econòmica de les solucions proposades.

### 6.3. Empresa i repte

Durant el curs 2023/24, en el context d'aquesta assignatura es va treballar amb els reptes plantejats per l'empresa SENER. En els paràgrafs següents es fa una breu descripció tant de l'empresa com del repte proposat (veure Taula 6.1).

*Taula 6.1. Relació de tasques del repte SENER*

<b>Repte SENER</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Conèixer les característiques constructives principals d'una línia de ferrocarril.</li> <li>– Definir el model teòric d'explotació comercial.</li> <li>– Analitzar els beneficis derivats de la construcció de la línia de ferrocarril.</li> <li>– Definir les característiques tècniques dels diferents sistemes ferroviaris i del material rodant.</li> <li>– Decidir quin sistema d'electrificació és el més adient per a les línies proposades.</li> <li>– Resoldre el dimensionament del sistema de tracció i definir-ne l'esquema general.</li> <li>– Comprendre el procés de validació mitjançant la simulació del sistema de tracció.</li> </ul>

#### ***6.3.1. Enginyeria del sistema de tracció de dues noves línies ferroviàries***

SENER és un grup privat d'enginyeria i tecnologia fundat el 1956, amb seu a Espanya, que opera en diversos sectors, incloent-hi l'aeroespacial, la defensa, l'energia i, especialment, l'enginyeria ferroviària. Amb més de 4.000 professionals en més de 100 disciplines tècniques, SENER destaca per la seva capacitat d'integrar coneixements per resoldre projectes complexos i innovadors (SENER, 2024).

L'empresa és líder en el disseny i implementació de projectes ferroviaris, amb més de 30 anys d'experiència en la creació de línies d'alta velocitat. Ha desenvolupat més de 15.000 km de vies i ha participat en projectes emblemàtics com la línia HS2 entre Londres i Birmingham i la connexió entre San Francisco i Los Angeles. Els seus serveis inclouen disseny i planificació, gestió de projectes, integració de sistemes i simulació d'operacions.

Els reptes plantejats per SENER volen analitzar les decisions tècniques que fan referència a l'electrificació ferroviària de dues línies noves de ferrocarril. A partir de les dades constructives bàsiques dels projectes, la proposta se centra a prendre la decisió sobre quin sistema d'electrificació escollir, determinar el número d'elements necessaris i analitzar el cost de construcció de les diferents alternatives.

## 6.4. Desenvolupament

L'assignatura de Gestió de Projectes i Noves Línies es divideix en sessions específiques que aborden diverses temàtiques. El repte proposat es va treballar de forma comuna ja que el nombre d'estudiants matriculats és reduït i es va realitzar en una sessió única de 6 hores de durada. El repte es va desenvolupar de la manera següent:

### 6.4.1. Cas 1: *Projecte del tren interurbà Mèxic - Toluca*

Aquest projecte té una longitud total de 57 km i uneix les estacions de Observatorio (Mèxic DF) i Zinacantepec (Toluca). Es preveu que la línia funcioni a una velocitat comercial de 90 km/h per fer el recorregut en 39 minuts, amb trens cada 5 minuts, i que la demanda evolucioni des dels 230.000 passatgers el 2025 fins als 540.000 el 2048. Es preveu un cost de construcció de 42.700 milions de pesos.

Durant l'explicació inicial es van presentar els punts més rellevants de la situació geogràfica, els mètodes constructius així com el traçats i els gradients, la superestructura de via, el sistema de comunicacions i senyalització, el centre de control i el material mòbil que prestarà servei.

A partir d'aquesta introducció, l'activitat consistia a establir els criteris de disseny del sistema de tracció. En primer lloc, es va haver de decidir quin sistema d'electrificació seria el més adequat per a aquesta línia (3000 Vdc, 1×25 kVac o 2×25 kVac). Per ajudar a valorar la millor alternativa, es van facilitar algunes dades rellevants com el cost econòmic de la construcció de les diferents catenàries o de les subestacions de tracció. També es van facilitar alguns valors estàndard de distàncies entre subestacions. En aquest cas, tot i que de l'anàlisi tècnica es

conclou la solució més viable, es va destacar que la decisió final executada es va prendre sobre la base de consideracions polítiques de caràcter internacional, i tot i que és té una solució viable tècnicament, no és l'òptima.

Finalment, es va presentar la solució adoptada en base a un reportatge fotogràfic, l'esquema general del sistema de tracció, així com l'esquema de les subestacions elèctriques.

#### ***6.4.2. Cas 2: Light rail vehicle Eglinton (Canadà)***

El segon cas a analitzar fou el projecte d'una nova línia ferroviària entre les estacions d'Eglinton i l'Aeroport de Pearson a Toronto, Canadà. Es tracta d'una línia de 10 km i amb una previsió d'ús de 69.700 viatgers per dia.

Durant l'explicació inicial, es van presentar les problemàtiques sorgides durant la construcció de la línia, així com els criteris de disseny de les estacions, les restriccions paisatgístiques i altres condicionants com trams existents o tipologia dels túnels. A partir d'aquest punt d'inici es va plantejar el dimensionament del sistema de tracció; en concret, es va demanar el nombre de subestacions de la línia, la definició de les ubicacions i la potència dels dispositius.

Com a dades rellevants, es proporcionava la informació relativa a la segregació total de la via, així com les freqüències demandades de 2 minuts i un temps de trajecte de 17 minuts amb una velocitat comercial de 80 km/h. Com a restricció, es definia que les escomeses en mitja tensió només estaven disponibles en les estacions i en les sortides d'emergència dels túnels. Es valoraven dues alternatives del sistema de tracció, 750 Vdc o 1.500 Vdc, amb unes distàncies entre subestacions d'1,5 i 5 km, respectivament. També es van presentar les característiques del material mòbil que recorrerà la línia.

A partir de totes aquestes dades era possible determinar el nombre de trens simultanis en la línia així com la potència mitjana dels trens i, per tant, calcular la potència consumida pel total de la flota, on s'ha de descomptar un 20 % degut a la possibilitat de recuperació d'energia. Amb aquests resultats era possible determinar la potència de les subestacions. Seguidament, també es va proposar l'anàlisi dels criteris de contingència i

fallada d'una subestació i, per tant, es va poder treballar sobre una situació de funcionament degradat.

Un cop es disposà del dimensionament, es va presentar el *layout* del sistema elèctric final, així com una proposta de les malles de funcionament i el consum de la línia. Es va fer èmfasi en el fet que a partir de les simulacions és possible extreure la demanda de cadascuna de les subestacions en diferents intervals de temps, així com les tensions màximes previstes i els temps de sobreexplotació per validar-ne el dimensionat.

## 6.5. Resultats

Per avaluar aquesta experiència docent s'han tingut en compte tres tipus d'evidències: els resultats acadèmics dels estudiants, el grau de satisfacció d'aquests i les valoracions aportades per l'empresa participant.

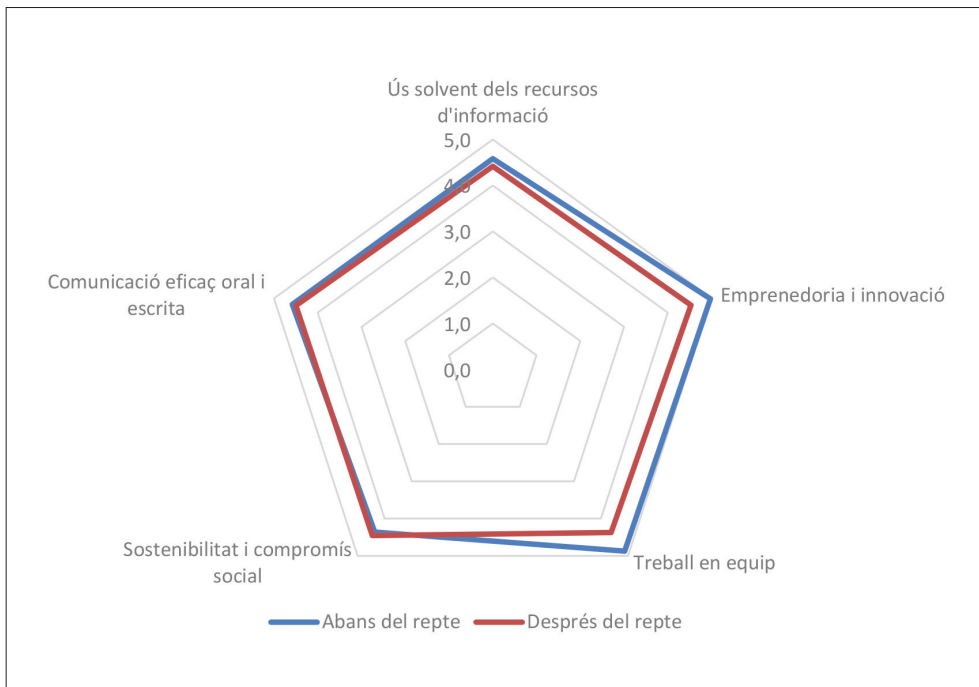
### 6.5.1. Resultats acadèmics

Les solucions plantejades per l'alumnat van ser avaluades per l'equip docent i per l'empresa de forma conjunta en un format de debat obert, tot i que no es va donar una nota numèrica al finalitzar el repte. Addicionalment, la Taula 6.2 inclou el llistat de competències sobre les quals els alumnes havien d'indicar el seu nivell d'assoliment abans del repte i un cop finalitzat. Cada competència es desglossava en ítems, cadascun dels quals s'avaluava en una escala de l'1 al 5.

*Taula 6.2. Competències avaluades en les autoavaluacions dels estudiants*

Ús solvent dels recursos d'informació
Emprenedoria i innovació
Treball en equip
Sostenibilitat i compromís social
Comunicació eficaç oral i escrita

El Gràfic 6.1 mostra la percepció de l'estudiantat sobre el nivell adquirit de cada competència (agregant els ítems que l'integren) previ a treballar en el repte i després de participar-hi. Per exemple, per a la competència d'ús solvent dels recursos d'informació es valorava l'ús de diferents fonts d'informació o l'organització i síntesi d'aquesta informació. Per a la competència d'emprenedoria i innovació, s'ha analitzat la generació d'idees originals i viables, l'abordatge de situacions, la iniciativa pròpia o la resposta a necessitats introduint nous elements. En el cas de la competència de treball en equip s'ha valorat la identificació dels objectius de grup, l'intercanvi d'informació o la planificació de tasques, mentre que en la competència de sostenibilitat i compromís social es tenien en compte aspectes com la identificació de problemes de diversa índole, el reconeixement d'actituds discriminatòries o sexistes, accions enfocades al desenvolupament humà o l'aplicació del disseny universal. Finalment, sobre la competència de comunicació eficaç oral i escrita, es consideraven aspectes com la generació de documents adequats segons la situació i un públic determinat, així com la capacitat de presentar oralment usant diverses estratègies comunicatives o diferents mitjans.



Gràfic 6.1. Percepció de l'estudiantat sobre el nivell d'adquisició de competències (abans i després del repte)

### 6.5.2. Satisfacció dels estudiants

Per avaluar el nivell de satisfacció dels estudiants amb la iniciativa, s'han utilitzat tant les enquestes de satisfacció oficials de la universitat com un qüestionari específic elaborat en el context del projecte InnoCrowd.

Pel que fa a les enquestes oficials, la Taula 6.3 recull els ítems que ofereixen dades sobre la incorporació de reptes dins de l'assignatura (participació del 20 % dels estudiants matriculats).

*Taula 6.3. Resultats de l'enquesta de satisfacció dels estudiants sobre l'assignatura*

Pregunta	Mitjana
Aquesta activitat m'ha servit per entendre millor els conceptes de l'assignatura	4,8
Aquesta activitat m'ha servit per entendre millor els problemes d'una empresa	4,5
Aquesta activitat m'ha servit per entendre millor el funcionament d'una empresa	4,5
En global, considero útil l'activitat realitzada	4,8
Estic satisfet/a amb com s'ha dut a terme l'activitat	5,0
M'agradaria que el treball per reptes s'incorporés també en altres assignatures	4,5

D'aquests resultats es poden treure les conclusions següents. En primer lloc, l'activitat ha sigut útil per entendre millor els conceptes sobre electrificació ferroviària tractats anteriorment (4,8), fet que suggereix que l'aplicació en casos pràctics és molt útil per facilitar l'enteniment d'una matèria sovint complexa per a enginyers no especialistes en sistemes elèctrics. A continuació, amb una puntuació de 4,5, es troben els ítems que fan referència a la utilitat de l'activitat per entendre millor els problemes i el funcionament d'una empresa. Aquesta nota indica que la temàtica i la metodologia introduïdes es corresponen amb les exigències d'un projecte real.



De forma global, l'activitat ha obtingut una valoració sobre la seva utilitat de 4,8, cosa que suggereix que l'estudiantat ha valorat molt positivament el repte proposat. A més, cal destacar que la valoració de satisfacció ha obtingut una valoració de 5,0 i que, per tant, no hi ha desafecció en cap cas. Finalment, cal destacar que la proposta d'incorporar aquest tipus de reptes s'incloués també a altres assignatures s'ha valorat amb un 4,5. Es pot concloure, doncs, que l'estudiantat està disposat a afrontar aquest tipus d'activitats en altres matèries i assignatures.

Algunes de les valoracions anteriors anaven acompanyades de comentaris molt positius quant a la metodologia utilitzada, l'ús de casos reals com a exemples a classe o la presentació de les fases inicials d'un projecte d'electrificació.

### ***6.5.3. Satisfacció de les empreses***

Per a les empreses, s'ha elaborat un qüestionari específic en el marc el projecte amb l'objectiu de recollir la satisfacció global de l'empresa participant que ha proposat el repte. Aquest qüestionari avalua l'impacte i l'eficàcia del projecte, així com el nivell d'implicació dels participants en la seva execució i supervisió. A la Taula 6.4 es presenten els resultats utilitzats en una escala de l'1 (molt baix/poc) al 5 (molt alt), i cal destacar que, en tots els casos, les puntuacions són altament positives.

Per últim, en aquest qüestionari a empreses també s'inclouïa un camp obert per a comentaris. De les observacions rebudes destaca la importància de donar una visió pràctica i d'aplicació dels coneixements obtinguts en el màster perquè d'aquesta manera l'estudiantat entén com es tradueix en el món laboral la part més teòrica, i també els dona una motivació per tal de profunditzar els seus coneixements.

Taula 6.4. Resultats de l'enquesta de satisfacció de les empreses que han plantejat reptes

Pregunta	Mitjana
<i>Satisfacció general</i>	
Haver participat en el projecte InnoCrowd plantejant un repte	5
Qualitat dels resultats obtinguts gràcies al projecte	4
Les solucions assolides han estat en línia amb les expectatives que es tenien	4
Compromís dels estudiants en la realització del repte proposat	5
Compromís del professorat en la supervisió i coordinació del repte proposat	5
<i>Conformitat amb el projecte</i>	
Participar plantejant un repte ha sigut una iniciativa interessant per a la vostra empresa	5
Es tracta d'una activitat enriquidora que ajuda a millorar la transició dels estudiants al món laboral	5
És una proposta que permet als estudiants assolir coneixements rellevants	5
És una iniciativa que afavoreix les relacions universitat-empresa	5

## Referències

- MAFEX (2024). *El ferrocarril, una indústria atractiva generadora de empleo*. <https://magazine.mafex.es/el-ferrocarril-una-industria-atractiva-generadora-de-empleo/>, data d'accés 11/11/2024.
- Profillidis, V. (2022). *Railway Planning, Management, and Engineering* (5th ed.). Routledge.
- SENER (2024). Sener Main Web. <https://www.group.sener/>, data d'accés 13/11/2024.
- Su, S.; Tian, Z (2023). *Energy-Efficient Train Operation: A System Approach for Railway Networks*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-34656-9>