



Titulació:

GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS

Alumne (nom i cognoms):

ISAAC NICOLÁS JUAN

Enunciat TFG / TFM:

ANÀLISI D'UN SISTEMA DE CÀRREGA DE VEHICLES ELÈCTRICS EN
MOVIMENT

Director/a del TFG / TFM:

DANIEL ARUMÍ DELGADO

Convocatòria de lliurament del TFG / TFM:

QUADRIMESTRE DE TARDOR 2020-2021



Resum

L'actual electrificació del sector del transport, impulsada com a solució per mitigar els seus efectes contribuents al Canvi Climàtic, està accelerant la implementació cada cop major dels vehicles elèctrics (EV) a les nostres vides. La necessitat dels EVs de competir amb la seva alternativa, els vehicles de combustió interna (ICE), provoca que els fabricants augmentin la capacitat de les bateries per tal d'intentar competir en autonomia amb els vehicles de combustió interna. Aquest fet encareix el preu final dels vehicles elèctrics i genera la necessitat d'assegurar cada cop més recursos per tal de mantenir la producció de bateries.

En aquest context és on apareix la idea de l'aplicació de sistemes de càrrega de vehicles elèctrics en moviment, que queden englobats en un concepte més genèric conegut com Electric Road Systems (ERS). Les solucions tecnològiques ERS presenten la capacitat de subministrar energia a vehicles elèctrics en moviment per tal de fer funcionar el seu motor elèctric i/o carregar el "battery-pack" del vehicle mentre aquest circula per la carretera. Generalment això es pot fer de manera conductiva, exigint un contacte directe entre el vehicle i el sistema o bé de manera inductiva, fent ús de la ressonància magnètica entre un element emissor i un element receptor.

Ben implementades, es contempla la idea de que aquests sistemes permetin en un futur la reducció de la capacitat de les bateries dels vehicles elèctrics i l'augment de la seva autonomia mitjançant l'encadenament de diversos ERS col·locats en rutes estratègiques. D'aquesta manera, els fabricants no s'hauran d'embarcar en la competitivitat de l'autonomia, permetent així fer un ús més reduït de les bateries que a la vegada significaria una reducció en el preu final dels EVs fent-los més accessibles per al gran públic.

Aquest estudi presenta una anàlisi de les diferents alternatives disponibles per tal de implementar aquesta tecnologia i l'aplicació d'un mètode de selecció d'alternatives per tal de proposar una o un conjunt de solucions adequades per a fer-ho en funció d'uns criteris definits.



Abstract

The current electrification of the transport sector driven as a solution to mitigate its effects contributing to Climate Change is accelerating the increasing implementation of electric vehicles (EVs) in our lives. The need for EVs to compete with their alternative, the ICEs, is causing manufacturers to increase battery capacity in an attempt to compete with the range of internal combustion vehicles. This increases the final price of electric vehicles and creates the need to secure more and more resources in order to maintain battery production.

It is in this context that the idea of the application of charging systems for moving electric vehicles, that are included in a more generic concept known as Electric Road Systems (ERS), appears. ERS technological solutions have the ability to supply energy to moving electric vehicles in order to run their electric motor and / or charge the vehicle's "battery-pack" while it is traveling on the road. Generally, this can be done conductively, requiring direct contact between the vehicle and the system or inductively, making use of MR between an emitting element and a receiving element.

Well implemented, the idea is that these systems will allow, in the future, the reduction of the capacity of the batteries of the electric vehicles and the increase of their range by means of the usage of several ERS placed in strategic routes. This would allow manufacturers the possibility of not having to compete in range with ICEs, thus allowing a reduced use of batteries which in turn would mean a reduction in the final price of EVs making them more accessible for the large audience.

This study presents an analysis of the different alternatives available in order to implement this technology and the application of a Multicriteria Decision Making method in order to propose one or a set of suitable alternatives to do so depending on defined criteria.



Declaració d'Honor

I declare that,

the work in this Degree Thesis is completely my own work,

no part of this Degree Thesis is taken from other people's work without giving them credit,

all references have been clearly cited,

I understand that an infringement of this declaration leaves me subject to the foreseen disciplinary actions by *The Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

Isaac Nicolás Juan

13/01/2021

Title of the Thesis: ANÀLISI D'UN SISTEMA DE CÀRREGA DE VEHICLES
ELÈCTRICS EN MOVIMENT

Índex

1	Introducció.....	13
1.1	Objectius de l'estudi	13
1.2	Abast	13
1.3	Requeriments	13
1.4	Justificació.....	14
1.5	Diagrama de Gantt	16
2	Desenvolupament	17
2.1	Antecedents i Estat de l'art.....	17
2.1.1	Vehicles Elèctrics (EV)	18
2.1.1.1	Vehicles elèctrics de bateria (BEV)	19
2.1.1.2	Vehicles híbrids endollables (PHEV).....	19
2.1.1.2.1	Sistema en Paral·lel	20
2.1.1.2.2	Sistema en Sèrie.....	20
2.1.1.3	Vehicles híbrids elèctrics (HEV)	20
2.1.1.3.1	Mild Hybrids	21
2.1.1.3.2	Full Hybrids	21
2.1.1.4	Vehicle d'Hidrògen (FCEV)	21
2.1.2	Bateries d'ió liti	23
2.1.2.1	Terminologia bàsica	24
2.1.2.2	Principi de funcionament	25
2.1.2.2.1	Ànode.....	27
2.1.2.2.2	Càtode.....	27
2.1.2.2.3	Electròlit	28
2.1.2.2.4	Separador	28
2.1.2.2.5	Col·lectors	28
2.1.2.3	Tipus de bateries utilitzades als EV	29
2.1.2.3.1	Bateries Lead Acid	29
2.1.2.3.2	Bateries basades en el Níquel-Metall.....	29
2.1.2.3.3	Bateries basades en el Sodi.....	30
2.1.2.3.4	Bateries d'ió liti	30
2.1.2.4	Reciclatge.....	31
2.1.2.5	Futurs desenvolupaments	32
2.1.3	La càrrega de vehicles elèctrics	34
2.1.3.1	Terminologia de la infraestructura de càrrega	36
2.1.3.2	Connexió a corrent altern (AC), Càrrega lenta i semi-lenta	36
2.1.3.2.1	Carregador incorporat (OBC).....	38
2.1.3.2.2	Càrrega per Inducció estàtica (ICPT).....	39



2.1.3.3	Connexió a corrent directa (DC) o càrrega ràpida	40
2.1.3.4	Estàndards	41
2.1.3.4.1	IEC	41
2.1.3.4.2	SAE	42
2.1.4	Mètodes de càrrega en moviment	45
2.1.4.1	Conceptes bàsics i subsistemes	47
2.1.4.2	Regulació i Estàndards	49
2.1.4.3	Tecnologies ERS	50
2.1.4.3.1	Conducció	50
2.1.4.3.1.1	Siemens eHighway	51
2.1.4.3.1.2	Honda 450 kW Conductive ERS	54
2.1.4.3.1.3	Slide-in Conductive ERS	57
2.1.4.3.1.4	Elonroad	60
2.1.4.3.1.5	Elways	62
2.1.4.3.2	Inducció	64
2.1.4.3.2.1	Electreon	64
2.1.4.3.2.2	OLEV	66
2.1.4.3.2.3	Primove	67
2.1.4.4	Resum d'alternatives	69
3	Metodologia de selecció d'alternatives	70
3.1.1	Elements del procés de decisió	70
3.1.1.1	Criteris i Pesos	70
3.1.1.2	Alternatives i Matriu de Valoració	72
3.1.2	Definició dels mètodes de decisió	72
4	Resultats	75
5	Pressupost	80
6	Conclusions	81
6.1	Futurs Desenvolupaments	82
7	Bibliografia	84

Índex de il·lustracions

Il·lustració 1. Cost walk of Ice to Ev.....	14
Il·lustració 2. Sistema de càrrega en moviment inductiu	15
Il·lustració 3. Diagrama de Gantt.....	16
Il·lustració 4. Cel·la de Planté carregada per dues cel·les Bunsen	17
Il·lustració 5. Cel·la de Planté carregada per una màquina de Gramme	17
Il·lustració 6. Ventos de EVs per País	18
Il·lustració 7. Esquema d'un BEV	19
Il·lustració 8. Esquema d'un PHEV.....	20
Il·lustració 9. Esquema d'un HEV	21
Il·lustració 10. Esquema d'un FCEV.....	22
Il·lustració 11. Esquema d'una Fuel Cell	22
Il·lustració 12. Una cel·la Tesla	23
Il·lustració 13. Una bateria d'un smartphone Iphone	23
Il·lustració 14. Battery-Pack d'un EV	24
Il·lustració 15. Cel·la d'ió liti en càrrega.....	25
Il·lustració 16. Cel·la d'ió liti carregada.....	25
Il·lustració 17. Cel·la d'ió liti en descàrrega	26
Il·lustració 18. Esquema d'una cel·la d'ió liti	27
Il·lustració 19. Esquema del reciclatge de bateries d'ió liti	32
Il·lustració 20. Evolució de la capacitat de les bateries d'ió liti	32
Il·lustració 21. Esquema del Silici com a material per els Ànodes.....	33
Il·lustració 22. Expansió de la bateria amb silici a l'ànode.....	33
Il·lustració 23. Tipus de càrrega per EVs	35
Il·lustració 24. Esquema de càrrega d'un EV	35
Il·lustració 25. Càlcul del temps de càrrega d'un EV	36
Il·lustració 26. Esquema procés de càrrega amb obc	37
Il·lustració 27. Càrrega semi-lenta.....	38
Il·lustració 28. Esquema d'un OBC.....	38
Il·lustració 29. Esquema de càrrega estàtica per inducció	39
Il·lustració 30. Esquema d'un sistema de transferència d'energia per inducció..	39
Il·lustració 31. Esquema de càrrega ràpida	40
Il·lustració 32. Càrrega ràpida	40
Il·lustració 33. Connector Nema	42
Il·lustració 34. Connector J1772.....	43
Il·lustració 35. Connectors CSS, CHAdEMO i Tesla.....	43
Il·lustració 36. Esquema gràfic dels nivells de càrrega.....	44
Il·lustració 37. Esquema d'un EHDV	46
Il·lustració 38. Resum dels conceptes de sistemes de càrrega en moviment	46
Il·lustració 39. Conceptes bàsics dels ERS	48
Il·lustració 40. Subsistemes dels ERS.....	48
Il·lustració 41. Línies de conducció	51



Il·lustració 42. Pantògraf	52
Il·lustració 43. Mode Híbrid.....	52
Il·lustració 44. Demostracions a Suècia	53
Il·lustració 45. Components del sistema Honda	54
Il·lustració 46. Vista de detall del carril de càrrega	54
Il·lustració 47. Perspectives de futur del sistema	56
Il·lustració 48. Comparativa amb altres sistemes	56
Il·lustració 49. Camió adaptat a la tecnologia APS.....	57
Il·lustració 50. Esquema del braç col·lector.....	57
Il·lustració 51. Esquema del rail d'alimentació.....	58
Il·lustració 52. Diferències entre tramvies i turismes	58
Il·lustració 53. Rail d'alimentació	60
Il·lustració 54. Braç col·lector	61
Il·lustració 55. Esquema de la demostració.....	61
Il·lustració 56. Demostració eRoadArlanda	62
Il·lustració 57. Esquema de la tecnologia	62
Il·lustració 58. Components del sistema.....	63
Il·lustració 59. Bobines emissores.....	65
Il·lustració 60. Bobina receptora.....	65
Il·lustració 61. Esquema del sistema	66
Il·lustració 62. Esquema del sistema	67
Il·lustració 63. Rànquing gràfic de les alternatives	77



Índex de Taules

Taula 1. Paràmetres dels càtodes d'ió liti	28
Taula 2. Paràmetres de bateries Níquel-metall	29
Taula 3. Paràmetres de Bateries de Sodi.....	30
Taula 4. Comparació de tipus de bateries	30
Taula 5. Futurs desenvolupaments per bateries d'ió liti.....	34
Taula 6. Resum dels Modes de càrrega.....	42
Taula 7. Resum dels nivells de càrrega	44
Taula 8. Resum alternatives per conducció	50
Taula 9. Factors eHighway.....	53
Taula 10. Tipus de sistemes desenvolupats i paràmetres.....	55
Taula 11. Distància de càrrega del sistema	55
Taula 12. Factors Honda	56
Taula 13. Diferències entre tramvies i turismes.....	59
Taula 14. Factors Slide-in	59
Taula 15. Factors Elonroad	61
Taula 16. Factors Elways	64
Taula 17. Resum alternatives per Inducció	64
Taula 18. Factors Electreon	66
Taula 19. Factors de OLEV	67
Taula 20. Factors Primove	68
Taula 21. Resum de totes les alternatives	69
Taula 22. Matriu de valoració	72
Taula 23. Escala de Saaty.....	73
Taula 24. Matriu de comparació aparellada	73
Taula 25. Índexs de consistència aleatòria	73
Taula 26. Matriu aparellada de criteris	75
Taula 27. Pesos relatius, F_i^* i F_i^-	76
Taula 28. Valors de Q, S i R.....	76
Taula 29. Rànquing d'alternatives per Q, S, i R	77
Taula 30. Resum del Pressupost total de l'estudi.....	80



Nomenclatura

A	Ampere
AC	Alternating Current
AHP	Analytic Hierarchy Process
AP	Acidification Potential
APS	Alimentation Par le Sol
BEV	Battery Electric Vehicle
CCS	Combined Charging System
CHAdemo	Charge de Move
CI	Consistency Index
DC	Direct Current
eHighway	Electric Highway
EHDV	Electric Heavy-Duty Vehicle
EMI	Electromagnetic Interference
EMF	Electromagnetic Field
EOL	End of Life
EP	Eutrophication Potential
EREV	Extended-Range Electric Vehicle
e-Roads	Electric Roads
ERS	Electric Road Systems
EV	Electric Vehicle
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GHG	Green House Gas
GWP	Global Warming Potential
HDV	Heavy-Duty Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HTP	Human Toxicity Potential
IA	Random Index
ICE	Internal Combustion Engine
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ICPT	Inductively Coupled Power Transfer
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electric and Electronical Engineers
LAB	Lead Acid Battery
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LDV	Light-Duty Vehicle
LFP	Lithium Iron Phosphate
LMO	Lithium Manganese Oxide
LTO	Lithium Titanate Oxide
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MR	Magnetic Resonance
NCA	Nickel Cobalt Aluminum



NMC	Nickel Manganese Cobalt
OBC	On-board Charger
ODP	Ozone Depletion Potential
OLEV	Online Electric Vehicle
PC	Consistency Percentage
PE	Power Electronics
PEV	Plug-in Electric Vehicle
PFC	Power Factor Correction
PHEV	Plug-in Hybrid Electric vehicle
RMS	Root Mean Square
SAE	Society for Automotive Engineers
SEI	Solid Electrolyte Interface
SLI	Starting, Lighting and Ignition
SoC	State of Charge
S-WEVCS	Static-Wireless Electric Vehicle Charging System
V	Volts
WEVCS	Wireless Electric Vehicle Charging System



1 Introducció

1.1 Objectius de l'estudi

L'objecte d'aquest estudi és efectuar una anàlisi sobre sistemes de càrrega que poden ser emprats, mitjançant la tecnologia actual, per la càrrega de vehicles elèctrics en moviment. Això ens permetrà assentar les bases teòriques d'una discussió i avaluació de les diferents alternatives. L'objectiu d'aquest marc teòric és el de valorar quina de les alternatives presenta una proposta més atractiva. Aquesta decisió s'emmarcarà en la valoració d'aspectes com podrien ser el disseny del sistema, la seva eficiència, els costos d'implementació i gestió un cop incorporat, la planificació i fins i tot la comoditat en l'experiència de l'usuari final en l'ús d'un sistema donat.

1.2 Abast

- ✓ Realització d'un anàlisi sobre les diferents tipologies de sistemes de càrrega de vehicles elèctrics en moviment que existeixen actualment.
- ✓ Explicació de quina/es problemàtiques permeten solucionar aquest tipus de sistemes de càrrega en la situació actual dels vehicles elèctrics.
- ✓ Establir un llistat de factors, criteris o aspectes tecnològics, econòmics, etc. i les seves respectives importàncies a partir del qual es valorarà posteriorment cadascuna de les opcions.
- ✓ Discussió/valoració de les diferents alternatives de càrrega i decisió.

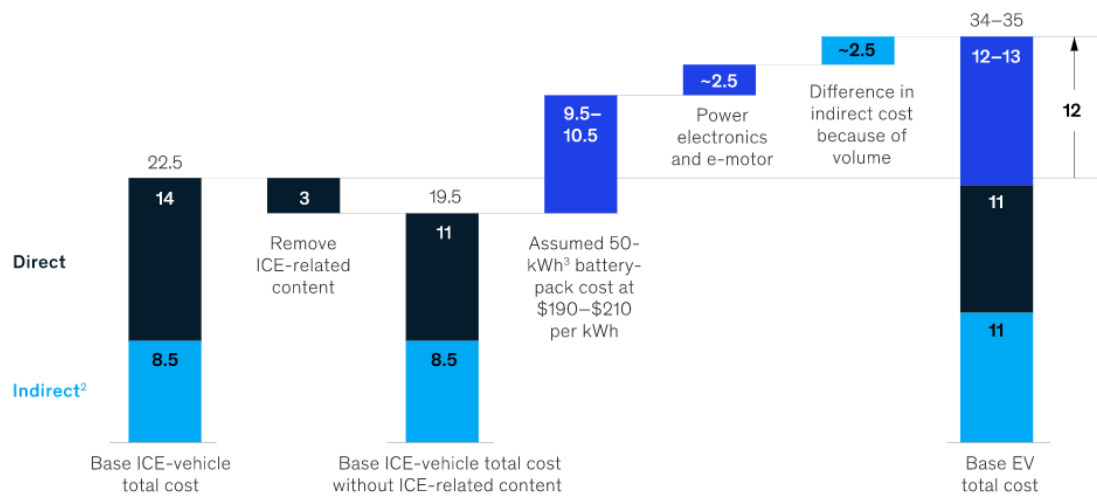
1.3 Requeriments

- ✓ La realització de l'anàlisi es durà a terme recopilant informació sobre la temàtica en qüestió intentant mantenir sempre una bona qualitat de les fonts que s'utilitzin.
- ✓ Les informacions alienes seran correctament citades i reconegudes als seus autors.
- ✓ Els factors a considerar hauran de ser coherents amb les necessitats que ha de cobrir un vehicle elèctric.
- ✓ Els pesos de cada factor s'assignaran en funció de la importància que aquests tinguin per a la viabilitat de l'ús d'un sistema de càrrega de vehicles elèctrics en moviment.
- ✓ S'haurà de prendre una decisió basada en la ponderació dels esmentats factors en cada cas.

1.4 Justificació

La justificació d'aquest estudi rau en l'intent de determinar quina és la millor alternativa per solucionar dues problemàtiques que tenen actualment els vehicles elèctrics. La primera problemàtica és el preu d'adquisició. Segons (Baik et al. 2019) la diferència de preu entre un vehicle elèctric i un de combustió interna és d'aproximadament 12000\$ sent l'opció elèctrica la més cara.

Cost walk of ICE¹ to electric-vehicle (EV) C-Car in 2019,
 estimated average per vehicle, \$ thousand



¹Internal combustion engine.
²Includes average incentive cost of \$2,000.
³Kilowatt-hour; includes battery-management system.
 Source: Industry experts; UBS; McKinsey analysis

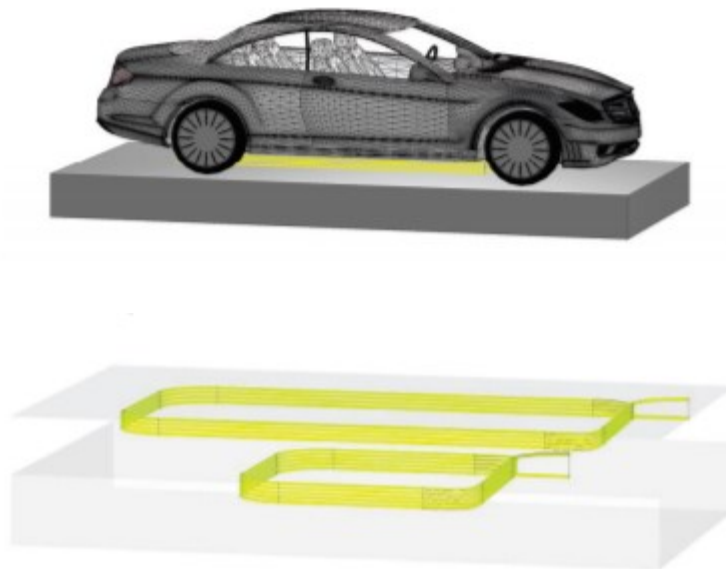
IL·LUSTRACIÓ 1. COST WALK OF ICE TO EV¹

Cal apuntar però, que un informe de la Universitat de Michigan (Sivak y Schoettle 2018) va arribar a la conclusió de que el cost operatiu d'un vehicle elèctric era menor que el d'un cotxe de combustió interna, el que reduiria a la llarga aquesta diferència en termes de cost de propietat del vehicle. Més enllà d'això, el preu d'un vehicle elèctric té una altra contrapartida, aquesta és que és fortament depenent del conjunt de bateries. Com podem veure comparant la columna del "battery-pack" amb la de "Base EV total cost", la primera representa entre un 27-30% del cost total del vehicle, cosa que condiona el preu de venda i fa que siguin menys assequibles per al gran públic.

¹ Font: (Baik et al. 2019)

La segona problemàtica que es pretén pal·liar és la de l'autonomia dels vehicles elèctrics. Tot i que segons (International Energy Agency 2020) la capacitat de les bateries va en augment i s'espera que assoleixin per l'any 2030 una autonomia d'entre 350-400 km, actualment i parlant en termes generals, els cotxes de combustió interna segueixen tenint més autonomia. D'altra banda la bateria del cotxe podria necessitar recanvi al cap del temps, que seria un cost que tornaria a recaure sobre l'usuari final.

Mitjançant un sistema de càrrega de vehicles elèctrics en moviment adient, es podria, per una banda, reduir la capacitat de les bateries dels vehicles elèctrics ja que la possibilitat de carregar periòdicament mentre el vehicle es desplaça únicament exigeix que aquest tingui una capacitat de bateria suficient per arribar al següent tram de càrrega. Per tant, amb menys capacitat el vehicle podria fer la mateixa distància.



IL·LUSTRACIÓ 2. SISTEMA DE CÀRREGA EN MOVIMENT INDUCTIU²

D'altra banda, al reduir la capacitat del "battery-pack" es reduiria el cost d'aquest bloc, cosa que permetria abaixar els preus de venda, fent-los així assolibles per a una massa de població més significativa. La problemàtica de l'autonomia quedaria en aquest sentit, depenent d'aquests sistemes de càrrega que tot i que reduïrien la capacitat de desplaçament del vehicle en si, permetrien encadenar càrregues consecutives sense haver d'aturar el vehicle simulant així el fet d'omplir el dipòsit en un cotxe de combustió interna. El fet de carregar en desplaçament solucionaria també el llarg temps de càrrega dels elèctrics front altres opcions.

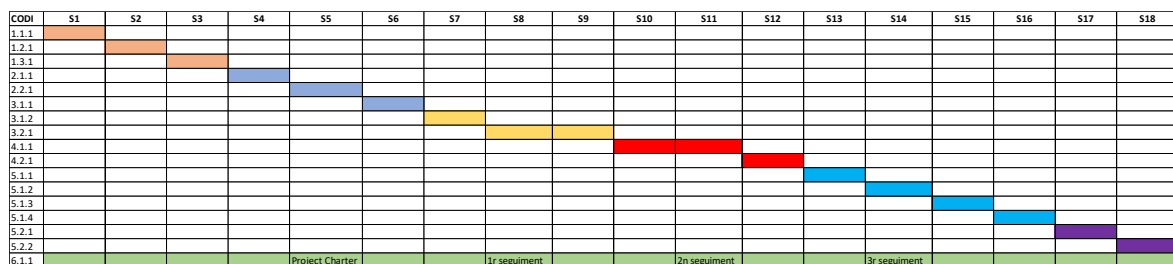
² Font:(Haider, Russer y Mfipt 2017)

Tot i que aquestes alternatives poguessin arribar a ser implementades, cal remarcar que la majoria de les opcions exigirien una inversió majúscula i una coordinació en fer que aquests sistemes estiguessin disponibles a múltiples països per tal d'aconseguir una implementació global i que els fabricants d'automòbils trobessin valor en aquest sistema.

Per acabar, dir que la direcció que el mercat del vehicle elèctric està prenent els últims anys no és ben bé aquesta. En canvi, les empreses estan realitzant inversions enormes en centres de R&D de tecnologies que permetin augmentar la capacitat de les bateries per abaratir-ne el preu i augmentar l'autonomia del vehicle. Per altra banda, grans empreses del sector opten per posar en funcionament estacions de càrrega en punts estratègics.

1.5 Diagrama de Gantt

En la següent figura podem veure el Diagrama de Gantt que conté la planificació de totes les tasques que s'han dut a terme per la realització d'aquest estudi.



IL·LUSTRACIÓ 3. DIAGRAMA DE GANTT³

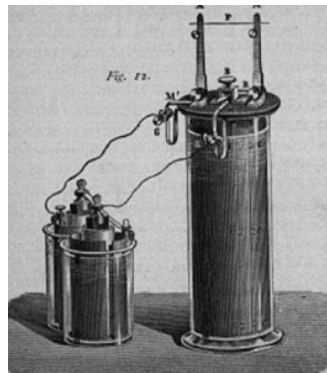
³ Font: Pròpia

2 Desenvolupament

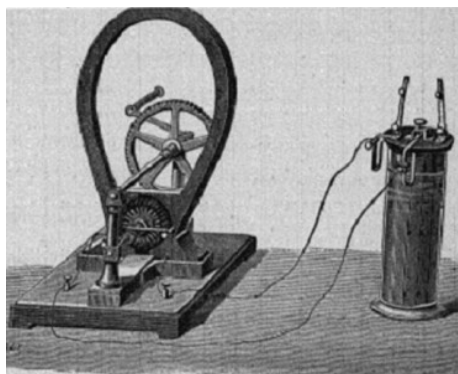
2.1 Antecedents i Estat de l'art

La càrrega de vehicles elèctrics és i ha estat generalment al llarg del temps realitzada de estàticament. Per tal de carregar el vehicle, el conductor ha d'aturar-se durant un període de temps, que serà més llarg o més curt, en funció del mètode, en que el vehicle s'estarà carregant. Existeix actualment una diversitat d'estacions i mètodes a través dels que es pot produir la càrrega del vehicle de manera estàtica i aquesta té lloc en el que es coneix com a estació de càrrega.

Parlar de càrrega de vehicles elèctrics és més aviat parlar de la càrrega de les seves bateries. La primera bateria considerada recarregable va ser inventada per Gaston Planté l'any 1859 (Kurzweil 2010). A la següent il·lustració podem veure la cel·la de Planté en procés de càrrega.



IL·LUSTRACIÓ 4. CEL·LA DE PLANTÉ CARREGADA PER DUES CEL·LES BUNSEN⁴



IL·LUSTRACIÓ 5. CEL·LA DE PLANTÉ CARREGADA PER UNA MÀQUINA DE GRAMME⁵

⁴ Font: (Kurzweil 2010)

⁵ Font: (Kurzweil 2010)

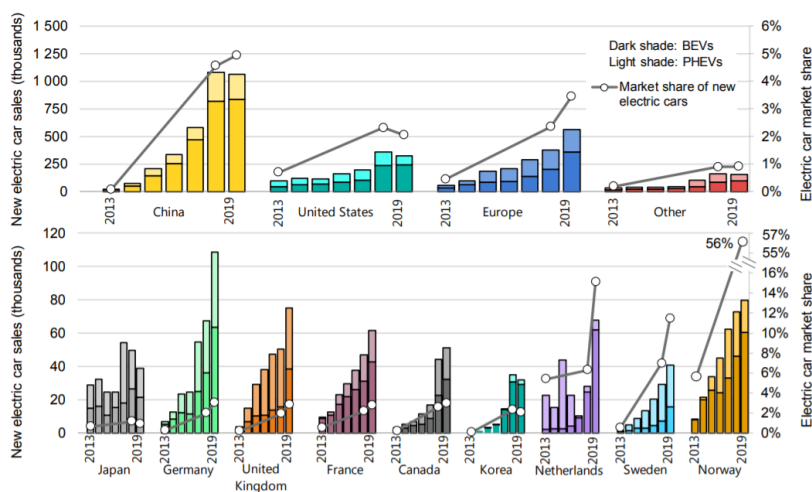
Es considera que els primers cotxes elèctrics es van inventar a principis del segle XIX. Aquests però, no es podien considerar cotxes realment funcionals, ja que comptaven amb bateries massa pesades i no recarregables. Va ser a partir de la invenció de Planté que les primeres bateries recarregables van aflorar i van donar lloc a models de cotxe elèctric més desenvolupats.

Tot i així, els vehicles elèctrics, que eren presents a les grans ciutats del moment, van perdre l'interès popular degut a la perfecció dels motors de combustió interna a finals del segle XIX i el posterior abaratiment de combustible a principis del segle XX va condemnar el desenvolupament tecnològic del cotxe elèctric que tenia menys autonomia i era més car de recarregar. En els últims 20 anys, els problemes originats a partir del consum de combustibles fòssils han donat un impuls al desenvolupament dels cotxes elèctrics.

2.1.1 Vehicles Elèctrics (EV)

Aquest apartat pretén donar una visió global de l'estat actual dels cotxes elèctrics, les seves tipologies, diferències i nomenclatura.

Els cotxes elèctrics han suscitat molt interès com a manera de pal·liar amb els efectes negatius en el clima del planeta i la qualitat de l'aire que el sector del transport i la mobilitat han provocat. És per això que neixen iniciatives per promoure'n la compra i es donen ajudes a qui vulgui adquirir-ne. El mercat dels cotxes elèctrics es troba en creixement i cada cop generen una millor impressió als ulls dels consumidors. A la següent figura podem veure com en general les quotes de mercat dels cotxes elèctrics als països o regions més significatives com ara la Xina, Estats Units o Europa tenen una tendència alcista mentre que el nombre de vendes disminueix de manera lleu.



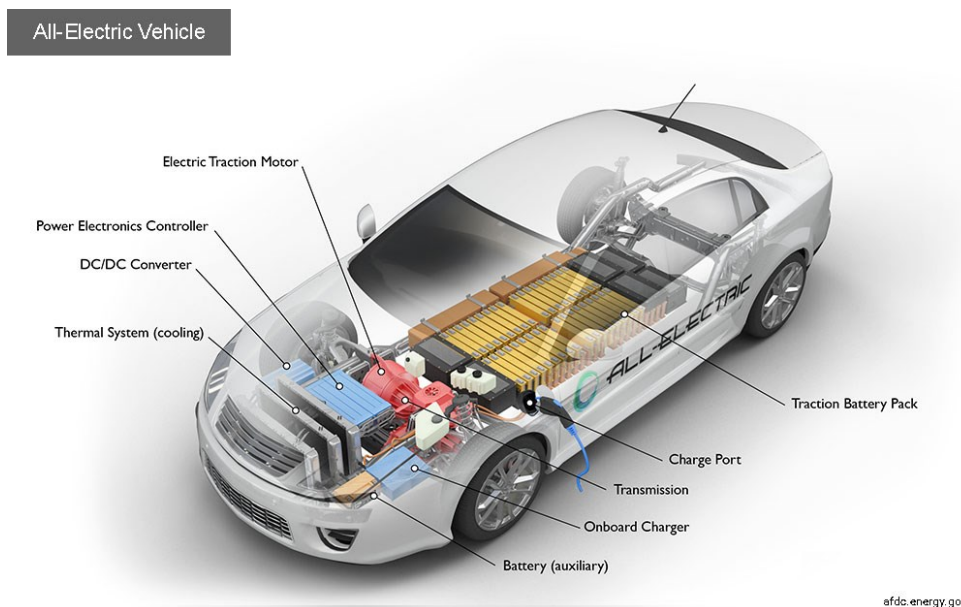
IL·LUSTRACIÓ 6. VENTES DE EVS PER PAÍS⁶

⁶ Font: (International Energy Agency 2020)

Els EV prenen formes i tipologies diferents en quant a funcionament i recàrrega i s'han d'analitzar separatament.

2.1.1.1 Vehicles elèctrics de bateria (BEV)

Els vehicles elèctrics de bateria BEV són aquells propulsats únicament mitjançant l'energia electroquímica emmagatzemada a les seves cel·les d'ió liti. Aquesta energia es transforma en moviment mitjançant un o més d'un motor elèctric, és a dir que no tenen un motor de combustió interna ICE. Els dos BEV més populars al món són el Tesla Model 3 i el Nissan Leaf. (International Energy Agency 2020).



IL·LUSTRACIÓ 7. ESQUEMA D'UN BEV⁷

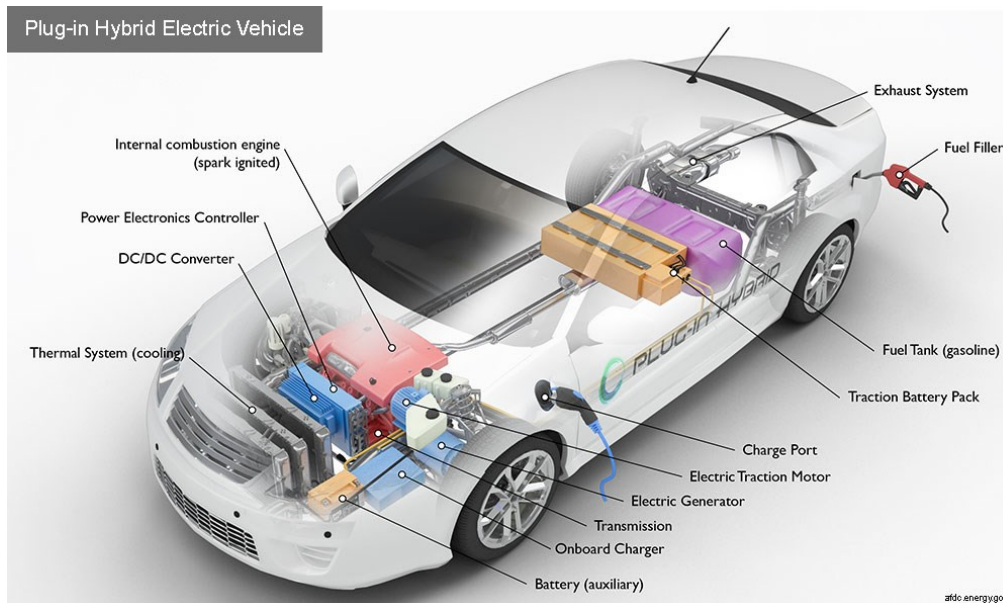
A la figura anterior es presenta un esquema d'un BEV on es poden veure les parts més importants i amb un "battery-pack" recarregat mitjançant un On-Board Charger OBC que està connectat a la xarxa.

2.1.1.2 Vehicles híbrids endollables (PHEV)

Per una altra banda existeixen els Plug-In Hybrid Vehicles. Aquests són vehicles híbrids que són compatibles amb una connexió a la xarxa. És a dir són vehicles amb un "battery-pack" que permet el funcionament del seu motor elèctric i que també gaudeixen d'un motor de combustió interna ICE. D'aquesta manera, els PHEV poden circular fent ús del motor elèctric fins a exhaurir les bateries i llavors fer ús del motor de combustió interna. L'avantatge d'aquests models és que minimitzen les emissions en una base diària ja que els trajectes diaris mitjans

⁷ Font: («Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work?» 2020)

acostumen a ser distàncies que poden ser cobertes únicament amb el motor elèctric.



IL·LUSTRACIÓ 8. ESQUEMA D'UN PHEV⁸

A l'anterior il·lustració podem veure la presència del ICE que rep combustible del dipòsit a la part posterior i el motor elèctric que rep corrent del "battery-pack" situat a la part baixa del vehicle.

2.1.1.2.1 Sistema en Paral·lel

El sistema paral·lel permet connectar el motor elèctric i el de combustió interna mecànicament de manera que ambdós motors puguin contribuir a la tracció de les rodes simultàniament.

2.1.1.2.2 Sistema en Sèrie

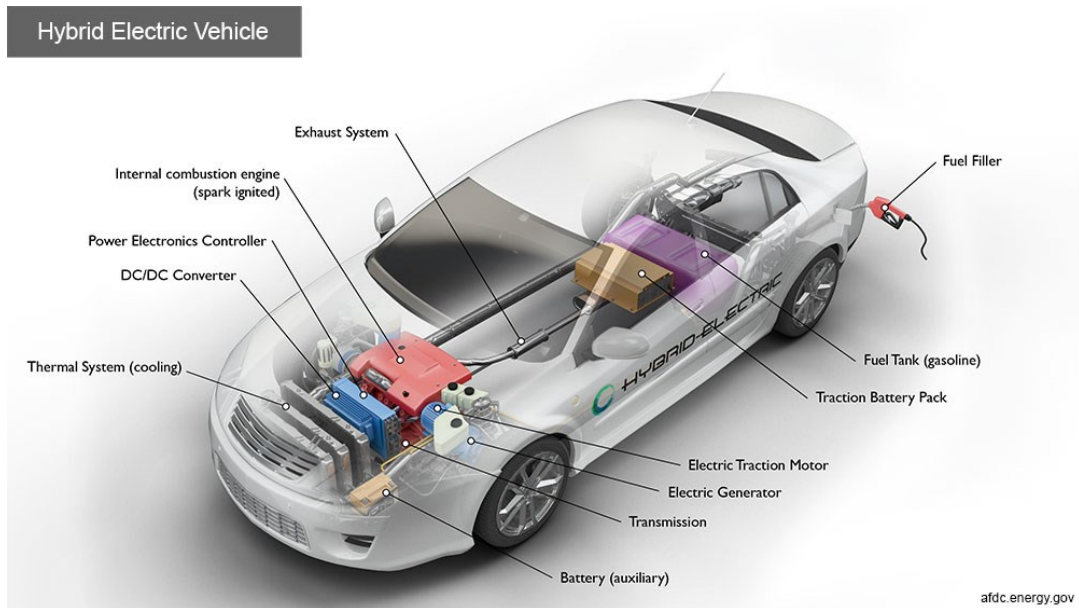
D'altra banda la configuració en sèrie utilitza únicament el motor elèctric per fer girar les rodes, mentre que el motor de combustió interna s'utilitza per generar electricitat que serà usada pel motor elèctric. Aquest tipus de vehicles es coneix també com a Extended-Range Electric Vehicle (EREV).

2.1.1.3 Vehicles híbrids elèctrics (HEV)

Un Hybrid Electric Vehicle consta com els PHEV d'un motor de combustió interna i un motor elèctric. El "battery-pack" proporciona corrent al motor elèctric però no es pot recarregar endollant-lo com seria el cas dels PHEV. En canvi, el "battery-pack" es recarrega mitjançant la frenada regenerativa o bé quan el ICE està en funcionament les bateries es recarreguen gràcies a que el motor elèctric actua

⁸ Font: («Alternative Fuels Data Center: How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Work?») 2020)

com a generador. A la següent figura podem veure un esquema dels components claus d'un HEV.



IL·LUSTRACIÓ 9. ESQUEMA D'UN HEV⁹

2.1.1.3.1 Mild Hybrids

Els vehicles amb aquesta configuració no poden propulsar el vehicle únicament a partir del motor elèctric però sí que permeten que aquest doni suport al motor ICE en determinats moments i que aquest s'apagui quan el vehicle s'atura ajudant a un millor ús del combustible.

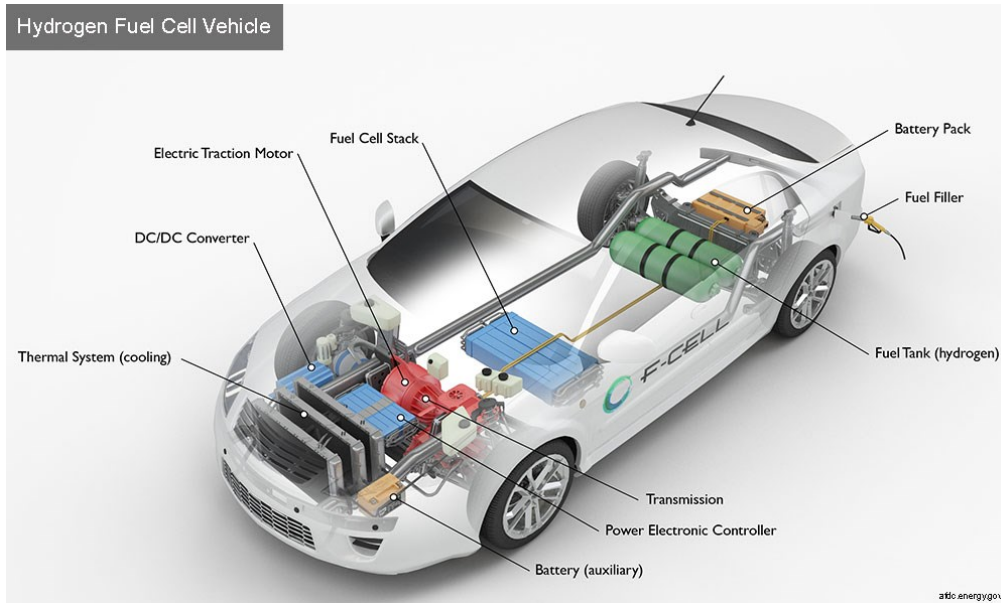
2.1.1.3.2 Full Hybrids

La configuració Full Hybrid consta d'un "battery-pack" més gran i de motors elèctrics més potents que permeten propulsar el vehicle en distàncies reduïdes proporcionant una millor optimització del combustible que els Mild Hybrids («Alternative Fuels Data Center: Hybrid Electric Vehicles» 2020).

2.1.1.4 Vehicle d'Hidrògen (FCEV)

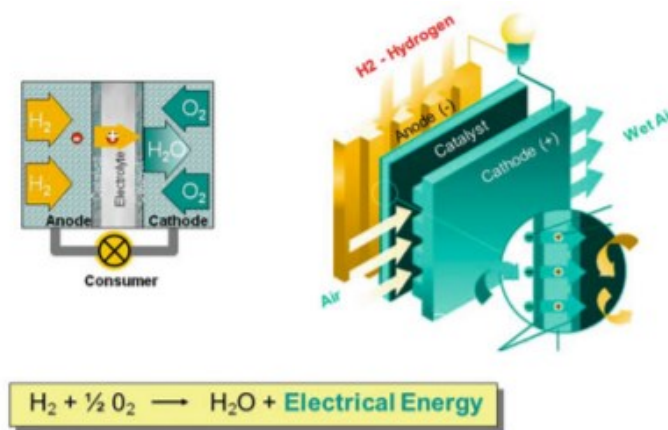
Els vehicles d'hidrògen, Fuel Cell Electric Vehicles, funcionen com els BEV mitjançant un motor elèctric. La diferència és que mentre que als BEV l'electricitat necessària per el funcionament del motor elèctric prové del "battery-pack", als FCEV aquesta electricitat prové de les "Fuel Cells".

⁹ Font: («Alternative Fuels Data Center: Hybrid Electric Vehicles» 2020)



IL·LUSTRACIÓ 10. ESQUEMA D'UN FCEV¹⁰

Una fuel cell és una cel·la composta per un ànode, electròlit i un càtode. L'hidrogen H₂ és proporcionat a l'ànode on un catalitzador s'encarrega de separar els protons i electrons. L'electròlit, que actua com a mitjà de transport i membrana permet el pas dels protons cap al càtode però no el dels electrons. En canvi, els electrons viatgen a través d'un circuit extern fins a arribar al càtode. («Alternative Fuels Data Center: How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?» 2020)



IL·LUSTRACIÓ 11. ESQUEMA D'UNA FUEL CELL¹¹

¹⁰ Font: («Alternative Fuels Data Center: How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?» 2020)

¹¹ Font: (Töpler 2016)

2.1.2 Bateries d'ió liti

Les bateries d'ió liti es troben a molts dels dispositius electrònics que utilitzem en el nostre dia a dia, des de smartphones, tablets, rellotges intel·ligents, etc. Aquestes són avui en dia l'estat de l'art de l'emmagatzematge d'energia electroquímica i s'han erigit com a les millors candidates per a dispositius com smartphones o cotxes elèctrics (Armand et al. 2020). El motiu d'èxit d'aquestes bateries va ser que tenien una densitat d'energia superior a les que existien. Aquesta densitat d'energia permet que es puguin fer bateries amb la mateixa densitat d'energia que altres bateries de diferents tipologies químiques amb una mida i pes més reduïts.



IL·LUSTRACIÓ 12. UNA CEL·LA TESLA¹²

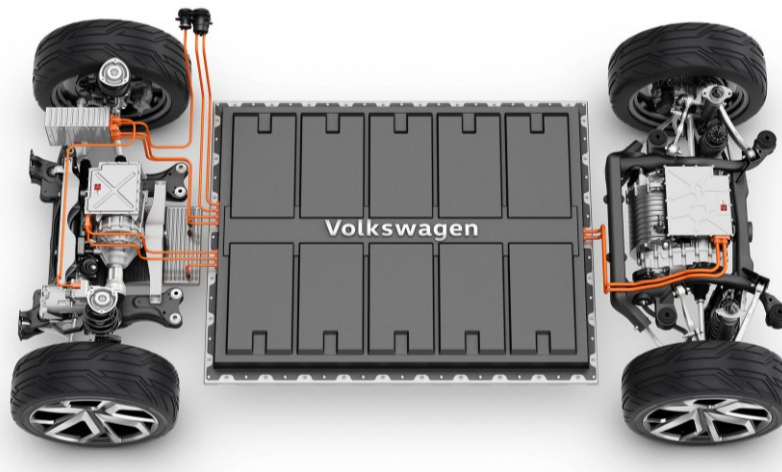


IL·LUSTRACIÓ 13. UNA BATERIA D'UN SMARTPHONE IPHONE¹³

Les bateries d'ió liti que s'utilitzen en vehicles elèctrics són de forma cilíndrica. Als vehicles elèctrics diverses d'aquestes cel·les cilíndriques s'agrupen per formar un mòdul. El "battery-pack" està format per múltiples mòduls. A les figures següents podem veure un mòdul de bateries i el "battery-pack" complet, que és situat a la part inferior del vehicle.

¹² Font: (Electrek 2020)

¹³ Font: (Sun et al. 2019)



IL·LUSTRACIÓ 14. BATTERY-PACK D'UN EV¹⁴

2.1.2.1 Terminologia bàsica

Abans de discutir el principi de funcionament de les bateries d'ió liti s'ha d'explicar la terminologia bàsica que s'utilitza en la indústria de les bateries d'ió liti. S'explicaran els termes que es creguin més convenients d'acord amb el nivell d'anàlisi d'aquest treball (Warner 2015a).

- ✓ **Capacitat:** La capacitat de les bateries, d'unitats [Ah], és una mesura que indica les hores que la bateria pot subministrar una certa intensitat fins arribar a un voltatge de descàrrega determinat.
- ✓ **Cicle:** El cicle de bateria es coneix com el procés de descàrrega i posterior càrrega de la bateria. Per tant, un cicle pot ser complet, si es produeix una descàrrega completa i una càrrega, o bé parcial si es descarrega la cel·la fins a un nivell determinat i després es carrega fins a un altre nivell específic.
- ✓ **Cicle de vida:** El cicle de vida és la quantitat de cicles complets de descàrrega i càrrega que la bateria pot suportar abans d'arribar al EOL (End of Life) que és quan la potència i l'energia de la bateria arriben a un 80% dels valors inicials.
- ✓ **Energia:** Aquest terme denota l'energia que una cel·la emmagatzema. Es mesura en [kWh].
- ✓ **Densitat d'energia:** La densitat d'energia és la relació que determina quanta energia una cel·la conté per unitat de massa o volum. Es mesura en [Wh/kg] quan se l'anomena densitat d'energia gravimètrica i en [Wh/L] quan ens referim a la densitat d'energia volumètrica.

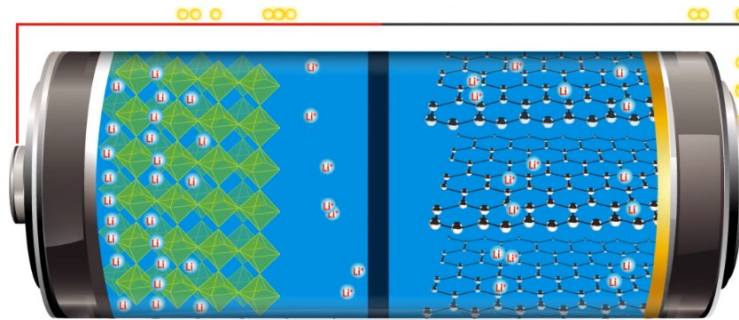
¹⁴ Font: (Volkswagen 2020)

- ✓ **Estat de càrrega:** L'estat de càrrega indica quina quantitat de càrrega queda a la bateria. Es mesura en format percentual. Es denota per SoC (State of Charge).

2.1.2.2 Principi de funcionament

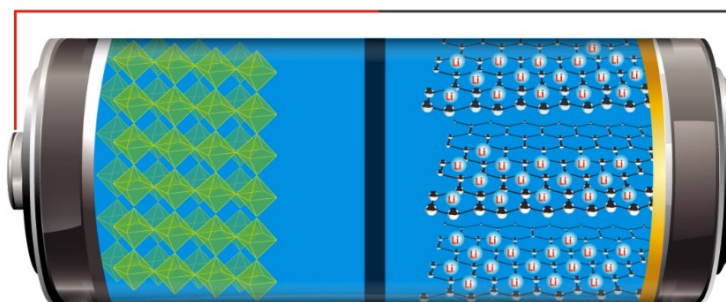
L'objectiu de les bateries d'ió liti és aconseguir emmagatzemar ions de liti i electrons al seu ànode de tal manera que en connectar-hi una càrrega es puguin proporcionar dos camins diferents de retorn a l'ànode, un per els ions i l'altre per els electrons.

Però per tal de poder situar els ions de liti a l'ànode primer els hem de retirar del càtode, el que equival al procés de càrrega de la bateria. Com podem veure a la il·lustració 15, en connectar una font de tensió entre el càtode i l'ànode els ions de liti que en un principi es troben al càtode es veuen forçats a moure's a l'ànode a través de l'electròlit.



IL·LUSTRACIÓ 15. CEL·LA D'ÍO LITI EN CÀRREGA¹⁵

Un cop tots els ions de liti es troben a l'ànode, la cel·la està totalment carregada.

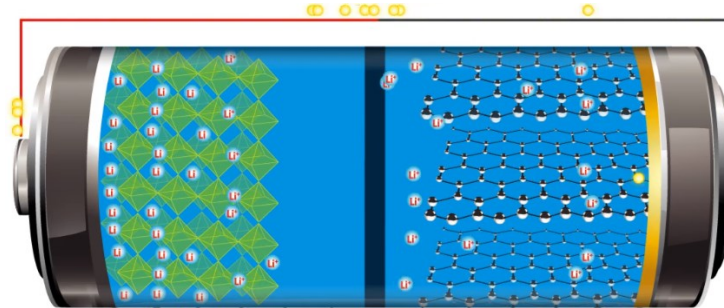


IL·LUSTRACIÓ 16. CEL·LA D'ÍO LITI CARREGADA¹⁶

¹⁵ Font: («How Does a Lithium-ion Battery Work? | Department of Energy» 2020)

¹⁶ Font: («How Does a Lithium-ion Battery Work? | Department of Energy» 2020)

Si en aquest estat connectem una càrrega, els ions de liti voldran tornar al càtode on tenen un estat més estable i la bateria experimentarà un procés de descàrrega. D'aquesta manera, els ions de liti retornen al càtode a l'electròlit i els electrons retornen a través de la càrrega, com es pot veure a la següent il·lustració.

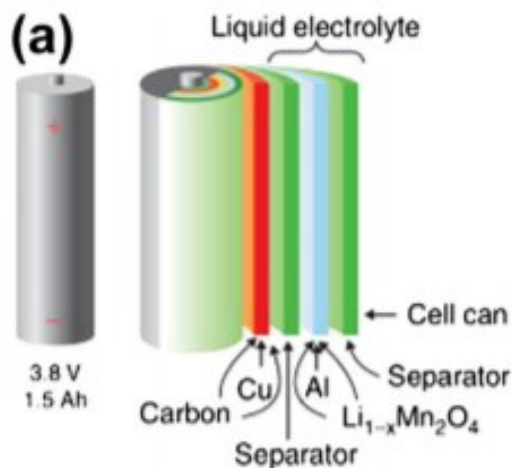


IL·LUSTRACIÓ 17. CEL·LA D'ÍO LITI EN DESCÀRREGA¹⁷

Existeix un fenomen que ocorre a les cel·les d'ió de liti durant el primer procés de càrrega que permet el funcionament d'aquestes. Els electrons a les capes de grafit de l'ànode suposen un problema ja que el seu contacte amb l'electròlit provoca la seva degradació. Tot i així aquests electrons mai acaben entrant en contacte amb l'electròlit gràcies a un fenomen que es descobrí de manera accidental. En la primera càrrega de la cel·la, els ions de liti emprenen el camí cap a l'ànode i s'impregnen de molècules d'electròlit. Els ions impregnats, en entrar en contacte amb l'ànode reaccionen amb el grafit i formen una capa coneguda com a "Solid Electrolyte Interface" que impedeix que els electrons degradin l'electròlit. Com a contrapartida, el procés de formació de la "SEI layer" consumeix al voltant d'un 5% del liti restant una part de la capacitat de la cel·la de manera irreversible.

Per tant, veiem que es tracta d'un tipus de bateries que té relativament poques parts. En termes generals, les parts principals d'una cel·la d'ió de liti són el càtode, ànode, electròlit, separador i els col·lectors de corrent elèctric d'alumini i coure. Cadascuna d'aquestes parts té una funció específica que permet el correcte funcionament de la cel·la (Warner 2015b).

¹⁷ Font: («How Does a Lithium-ion Battery Work? | Department of Energy» 2020)



IL·LUSTRACIÓ 18. ESQUEMA D'UNA CEL·LA D'IÓ LITI¹⁸

2.1.2.2.1 Ànode

La principal funció de l'ànode en les bateries d'ió liti és la de proporcionar una estructura en la que es puguin emmagatzemar els ions de liti fins que en un moment donat es connecti una càrrega i es pugui fer ús de l'energia emmagatzemada.

L'estat de l'art dels ànodes en l'actualitat és el grafit (C)(Li et al. 2020). Als ànodes el grafit s'organitza en capes de grafè que s'apilen unes sobres les altres i que estan dèbilment unides per enllaços de Van der Waals. Aquest fet permet que els ions de liti i els electrons quedin emmagatzemats a l'ànode en un procés conegut com a intercalació. El desintercalat que es produeix en connectar una càrrega

Actualment s'està treballant en implementar ànodes de Silici que permetrien produir cel·les d'ió liti amb una densitat d'energia superior a les cel·les amb ànode de grafit.

2.1.2.2.2 Càtode

El càtode també compleix una funció de hoste pel liti i s'encarrega de deixar-lo anar quan es produeix la càrrega de la cel·la, és a dir quan s'hi aplica una font de tensió.

Els càtodes més utilitzats en les bateries d'ió liti són el que es coneix com a òxids de metall de liti. Aquests aporten al liti estructures hoste del tipus MO_2 on M és un o bé una combinació de metalls. Per exemple Tesla utilitza un tipus de bateries conegudes com a NCA (Nickel Cobalt Aluminium) donat que optimitzen la densitat d'energia i altres fabricants com Nissan que utilitzen NMC (Nickel-Manganese-

¹⁸ Font: (Warner 2015b)

Cobalt) optimitzen per cost. A la taula següent podem veure la diferència en la densitat d'energia.

Code	Stoichiometry	Structure type	SG	Practical specific capacity (mAh g ⁻¹)	Average potential (V vs. Li ⁺ /Li)	Specific energy active material combination (Wh kg ⁻¹)
LFP	LiFePO ₄	phospho olivine	<i>Pnma</i>	165	3.45	379
LFMP	LiMn _{0.7} Fe _{0.3} PO ₄	phospho olivine	<i>Pnma</i>	155	3.90	412
LCP	LiCoPO ₄	phospho olivine	<i>Pnma</i>	150	4.75	492
LCO	LiCoO ₂	layered oxide	R-3m	150	3.90	402
NMC ₁₁₁	LiNi _{0.33} Mn _{0.33} Co _{0.33} O ₂	layered oxide	R-3m	160	3.70	399
NMC ₅₃₂	LiNi _{0.5} Mn _{0.3} Co _{0.2} O ₂	layered oxide	R-3m	165	3.70	407
NMC ₆₂₂	LiNi _{0.6} Mn _{0.2} Co _{0.2} O ₂	layered oxide	R-3m	170	3.70	416
NCA	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	layered oxide	R-3m	188	3.70	445
NMC ₈₁₁	LiNi _{0.8} Mn _{0.1} Co _{0.1} O ₂	layered oxide	R-3m	190	3.70	448
LNO	LiNiO ₂	layered oxide	R-3m	240	3.75	526
LRLO	Li[Li _{0.2} Ni _{0.2} Mn _{0.6-3x} M _x]O ₂	layered oxide	C/m	280	3.75	575
LMO	LiMn ₂ O ₄	spinel	Fd-3m	110	4.10	337
LMNO	LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₄	spinel	<i>P4₃32</i>	140	4.70	464
L ₂ MNO	Li ₂ Ni _{0.5} Mn _{1.5} O ₄	spinel (tetragonal)	<i>I4₁/amd</i>	280	3.70	567

TAULA 1. PARÀMETRES DELS CÀTODES D'ÍO LITI¹⁹

2.1.2.2.3 Electròlit

L'electròlit és la part de la bateria que té un estat de líquid/gel i en el qual es troben submergits tant el càtode com l'ànode. Les bateries actuals utilitzen electròlits amb solució orgànica que conté hexafluorofosfat de liti (LiPF₆) com a conductor del liti i una sèrie de soluts i additius. La funció de l'electròlit és la d'actuar com a conductor pels ions de liti quan aquests necessiten trobar un camí del càtode a l'ànode en el procés de càrrega i de l'ànode al càtode en el procés de descàrrega. Una altra funció important és la de la formació de la SEI (Solid Electrolyte Interface).

2.1.2.2.4 Separador

El separador és la part de la bateria que té, com el seu nom indica la funció de efectivament separar l'ànode del càtode. Això és necessari ja que en cas de que el càtode i l'ànode entrin en contacte es produiria un curtcircuit provocant la fallida de la cel·la. Generalment es tracta d'un film de polímer que degut a les seves propietats de microporositat permet el pas dels ions de liti però no el dels electrons.

2.1.2.2.5 Col·lectors

Els col·lectors són les part de la cel·la encarregades de recollir el corrent elèctric al càtode i l'ànode.

Generalment el col·lector positiu, el del càtode és una làmina d'alumini que està en contacte amb l'òxid de metall i que recull els electrons en el procés de càrrega de la cel·la.

¹⁹ Font: (Armand et al. 2020)

El col·lector negatiu acostuma a ser de coure i anàlogament s'encarrega de la recollida dels electrons de l'elèctrode negatiu en el procés de descàrrega de la cel·la.

2.1.2.3 Tipus de bateries utilitzades als EV

Un cop explicat el funcionament, en aquest apartat s'exposarà una visió orientativa dels tipus de bateries que existeixen i quines són les més usades a dia d'avui. (Warner 2015b)

2.1.2.3.1 Bateries Lead Acid

Les bateries Lead Acid(Plom-àcid), també conegudes com a LAB, són unes de les més comunes i antigues. Tot i que van ser usades als inicis del desenvolupament dels EV són avui en dia l'estàndard utilitzat en aplicacions SLI. Es tracta de bateries amb un bon funcionament però que tenen un cicle de vida curt d'entre 300 i 500 cicles.

2.1.2.3.2 Bateries basades en el Níquel-Metall

Les bateries basades en la combinació Níquel-Metall van guanyar popularitat enfront les de Plom Àcid degut a que eren capaces de presentar més voltatge, capacitat i un cicle de vida més llarg que la seva competidora. Tot i així, seguien presentant alguns problemes com ara l'efecte memòria i en alguns casos alts nivells d'auto-descàrrega. A la següent figura podem veure una taula resum d'alguns tipus de químiques basades en el Níquel-metall i algunes característiques importants.

	Nickel Metal Hydride	Nickel Cadmium	Nickel Zinc	Nickel Hydrogen
Chemistry descriptor	NiMh	NiCd	NiZn	NiH ₂
Specific energy (Wh/kg)	30-80	40-60	70-110	50-65
Energy density (Wh/L)	140-300	50-150	130-350	55-110
Specific power (W/kg)	250-1000	150	280-2500	-
Power density (W/L)	400	210	420-7000	-
Nominal voltage (per cell) (V)	1.2	1.2	1.6	1.4
Cycle life	500-1500	1000-2000	300-900	>2000
Self-discharge (% per month)	30%	20%	20%	-
Operating temperature range (°C)	-20 to +60	-40 to +60	-20 to +50	-
Applications	Automotive hybrid electric vehicle (HEV)	Consumer electronics, power tools, light rail and train, uninterruptible power supplies, emergency lighting, telecom	Power tools, lawn and garden tools, light electric vehicles, HEVs	Satellite applications: Low earth orbit and geosynchronous earth orbit

TAULA 2. PARÀMETRES DE BATERIES NÍQUEL-METALL²⁰

²⁰ Font: (Warner 2015b)

2.1.2.3.3 Bateria basades en el Sodi

Un altre tipus de bateries interessants són les basades en sodi. Aquestes bateries tenen la particular qualitat de que treballen a una temperatura entre 350-700°C. Aquestes bateries operen amb el sodi en estat fos que actua com a ànode. El càtode està format per níquel i els dos elèctrodes estan separats per un separador ceràmic. Tenen la característica de ser de baix cost, donat que els materials necessaris per fabricar-les també ho són. A la següent taula podem veure un resum dels tipus i algunes de les seves característiques més importants.

	Sodium Metal Halide	Sodium Sulfur
Chemistry descriptor	Sodium aluminum chloride (Na-AlCl ₄) Sodium nickel chloride (Na-NiCl ₂)	NaS
Specific energy (Wh/kg)	90-120	110
Energy density (Wh/L)	160	-
Specific power (W/kg)	150-180	150
Power density (W/L)	-	-
Nominal voltage (per cell) (V)	2.6	2.1
Cycle life	1000-1500	1000
Activation temperature range (°C)	270-350	350-700
Companies	ZEBRA, Eagle-Picher, GE, SONICK-FIAMM	
Applications	Automotive electric vehicle, military, space, telecommunications, train and rail, and stationary energy storage	Space and satellite applications

TAULA 3. PARÀMETRES DE BATERIES DE SODI²¹

2.1.2.3.4 Bateria d'ió liti

Havent dedicat l'anterior apartat a l'explicació del funcionament de les bateries d'ió liti, presentarem ara una taula resum de les tipologies de bateries d'ió liti que existeixen i algunes de les seves característiques més importants:

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	Lithium Nickel Manganese Cobalt
Cathode chemistry descriptor	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Specific energy (Wh/kg)	80-130	105-120	70	120-150	80-220	140-180
Energy density (Wh/L)	220-250	250-265	130	250-450	210-600	325
Specific power (W/kg)	1400-2400	1000	750	600	1500-1900	500-3000
Power density (W/L)	4500	2000	1400	1200-3000	4000-5000	6500
Volts (per cell) (V)	3.2-3.3	3.8	2.2-2.3	3.6-3.8	3.6	3.6-3.7
Cycle life	1000-2000	>500	>4000	>700	>1000	1000-4000
Self-discharge (% per month)	<1%	5%	2-10%	1-5%	2-10%	1%
Cost (per kWh)	\$400-\$1200	\$400-\$900	\$600-\$2000	\$250-\$450	\$600-\$1000	\$500-\$900
Operating temperature range (°C)	-20 to +60	-20 to +60	-40 to +55	-20 to +60	-20 to +60	-20 to +55

TAULA 4. COMPARACIÓ DE TIPUS DE BATERIES²²

²¹ Font:(Warner 2015b)

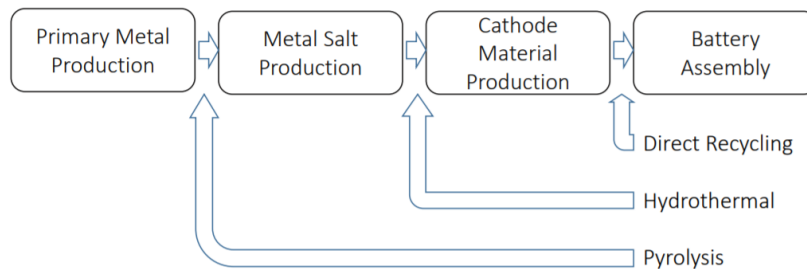
²² Font: (Warner 2015b)

2.1.2.4 Reciclatge

El clar augment en la quota de mercat de la mobilitat elèctrica provocarà en el futur un augment de la demanda de matèries primes per la fabricació de bateries i farà que ens replantegem la manera en la que reciclem aquestes bateries per tal d'establir processos de fabricació més sostenibles. La tecnologia de les bateries d'ió liti és ja una tecnologia madura, tot i que té marge de millora. La presència, cada cop més significativa, de les bateries d'ió liti a les nostres vides ha augmentat la conscienciació sobre els potencials efectes sobre el medi ambient que la producció i eliminació d'aquestes bateries pot significar.

A l'hora d'estudiar els impactes sobre el medi ambient que la producció de bateries pot ocasionar, la categoria de GWP és normalment la més analitzada. Per donar una referència, la producció de bateries d'ió liti produeix de mitja, unes emissions de GHG per cada 1kWh de capacitat de 110 g de CO₂eq. Tot i així, la producció de bateries també produeix impactes en aspectes com l'acidificació (AP), eutrofització (EP), toxicitat humana (HTP) i emissions d'ozó (ODP) (Peters et al. 2017).

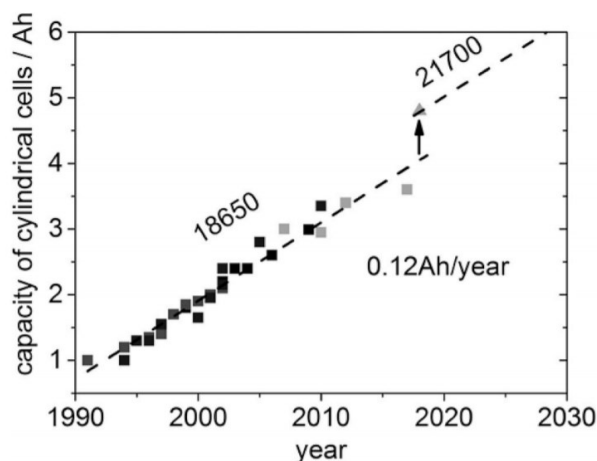
Com hem vist, la demanda de matèries primes per la fabricació de bateries d'ió liti té expectatives d'experimentar un gran creixement. Per tal d'abastir aquesta tendència serà necessari establir processos de reciclatge sostenibles. A dia d'avui però, la directiva 2006/66/EC només exigeix el reciclatge de un 50 wt%(percentatge en pes). S'esperen directives més exigents en el percentatge en pes a reciclar de les bateries d'ió liti en un futur. Això serà tot un repte per empreses que actualment utilitzen tecnologies poc eficients. La majoria d'empreses dedicades al reciclatge de les bateries d'ió liti utilitzen processos basats en la pirometal·lúrgia. Aquests processos barregen bateries basades en Níquel-metall amb bateries d'ió liti en un procés de fosa que no permet la recuperació del liti, manganès o l'alumini donat que acaben al subproducte conegut com a escòria. Si que es recuperen en canvi elements com el cobalt, coure o ferro en forma d'aliatge, el qual encara és necessari que experimenti un procés hidrometal·lúrgia per obtenir els elements per separat. (Armand et al. 2020). Altres empreses utilitzen altres tècniques amb els seus avantatges i inconvenients. De manera general podem veure en el següent diagrama quines etapes del Life Cycle de les bateries permet evitar cada mètode. S'entén que com més etapes es puguin evitar més bona serà la tècnica envers el medi ambient.



IL·LUSTRACIÓ 19. ESQUEMA DEL RECICLATGE DE BATERIES D'ÍO LITI²³

2.1.2.5 Futurs desenvolupaments

Les bateries d'ió liti tenen un futur prometedor com a tecnologia de referència en la majoria d'aplicacions relacionades amb l'electrònica i la mobilitat i s'espera d'elles un gran desenvolupament donats els recursos que s'hi estan invertint tant a nivell privat com públic arreu del món. A la següent figura podem veure l'evolució de la capacitat de cel·les cilíndriques, utilitzades als EV i com existeix una tendència clarament positiva en el desenvolupament d'aquestes bateries.

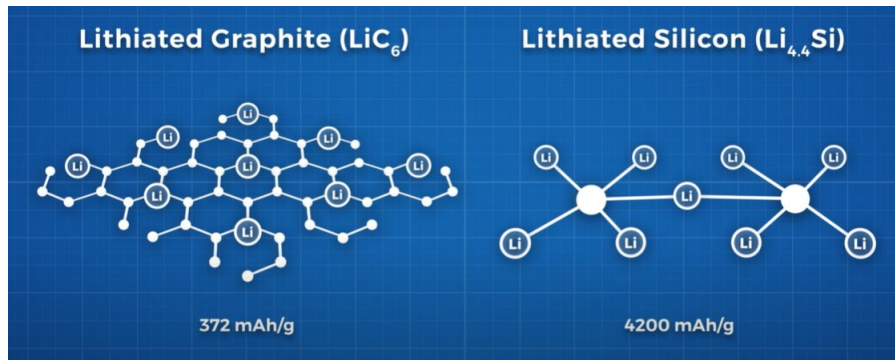


IL·LUSTRACIÓ 20. EVOLUCIÓ DE LA CAPACITAT DE LES BATERIES D'ÍO LITI²⁴

En quant a l'elèctrode negatiu, l'ànode, els desenvolupaments esperats prenen el camí d'augmentar el contingut de Silici en compostos amb carboni. Actualment, el grafit és el component per excel·lència utilitzat a l'ànode. El grafit, com hem comentat, emmagatzema el liti en la forma LiC_6 , és a dir que necessita de 6 àtoms de carboni per cada àtom de liti, donant una capacitat teòrica màxima de 324mAh/g. En canvi, si utilitzem el Silici com a material per als ànodes s'està fent recerca sobre la possibilitat d'emmagatzemar 4.4 àtoms de liti amb un sol àtom de Silici, donant així una capacitat teòrica de 4200 mAh/g. (Cui et al. 2009)

²³ Font: (Kushnir 2015)

²⁴ Font: (Armand et al. 2020)



IL·LUSTRACIÓ 21. ESQUEMA DEL SILICI COM A MATERIAL PER ELS ÀNODES²⁵

El problema és que quan aquests 4.4 àtoms de liti es combinen amb l'estructura de silici, la bateria experimenta un augment de volum del voltant del 400% de la seva mida quan es carrega. Aquesta expansió genera esforços sobre el material de l'ànode, finalment destruint-lo una vegada s'han produït un determinat nombre de cicles.



IL·LUSTRACIÓ 22. EXPANSIÓ DE LA BATERIA AMB SILICI A L'ÀNODE²⁶

D'altra banda, per a l'elèctrode positiu, el càtode s'esperen millores orientades a l'augment del contingut de Níquel en les làmines de òxid de metall de liti, mentre que també s'hauran de trobar solucions a efectes de seguretat per aquests casos.

Tenint en compte que els avenços més significatius dels darrers anys s'han dut a terme mitjançant la millora del disseny dels elèctrodes i la reducció de components, sembla prudent suposar que millores en aquest àmbit produiran augmentos en la densitat d'energia de les bateries futures.

Com ja hem comentat, la creixent importància de les bateries d'ió liti a les nostres vides fa que sorgeixi la necessitat d'implementar solucions per incrementar la seva sostenibilitat. Aquestes solucions s'hauran d'implantar en àmbits com la seva síntesi i processament, assemblatge, cicle de vida i reciclatge.

²⁵ Font: («Tesla's Battery Supply Problem - YouTube» 2020)

²⁶ Font: («Tesla's Battery Supply Problem - YouTube» 2020)

Per acabar es presenta una taula en la que es poden apreciar els KPI actuals en la indústria de les bateries d'ió liti i també prediccions sobre els mateixos per als anys 2030 i 2050.

	Current (2020)	2030	2050
Performance targets for automotive applications unless indicated otherwise			
1	Gravimetric energy density (Wh kg⁻¹)		
	Pack level	90-180	190-230 >250
	Cell level	160-260 ^a	275-320 >350
2	Volumetric energy density (Wh L⁻¹)		
	Pack level	250-400	450-550 >600
	Cell level	450-730	750-900 >1000
3	Typical gravimetric power density (continuous discharge from 100% - 20% SOC; W kg⁻¹)		
	Cell level	340-500 ⁷	800-1100 >1200
4	Typical volumetric power density (continuous discharge from 100% - 20% SOC; W L⁻¹)		
	Cell level	ca. 1000	ca. 2000 >3000
5	Typical fast charging time (min)		
	Fast charging time for BE (20%-80% SOC, 25 °C)	15-30	10-15 <10
6	Battery lifetime		
	Cycle life for BEV to 80% end-of-life capacity (cycles; ca. 25 °C ambient temperature)	ca. 1000	up to 2000 2500-5000
	Cycle life for stationary to 80% end-of-life capacity (cycles; 40-50 °C) ^b	5000	10,000 >10,000
	Calendar life (years; 80% energy)	ca. 10	10-15 15-20
7	Safety		
	Hazard levels (according to EUCAR [435] and SAE J2464 [436])	≤4	≤3 ≤3
Cost targets			
1	Cell level (€ kWh ⁻¹)	60-100	40-60 <50
	Battery pack level (€ kWh ⁻¹) ^c	90-140	65-110 40-70
Recycling targets^d			
1	Battery collection/take back rate		>50% >90%
2	Recycling efficiency (by average weight)	15% ^e	>40% ^f >90%
3	Economy of recycling ^g		ca. 150% ca. 50%

TAULA 5. FUTURS DESENVOLUPAMENTS PER BATERIES D'ÍO LITI²⁷

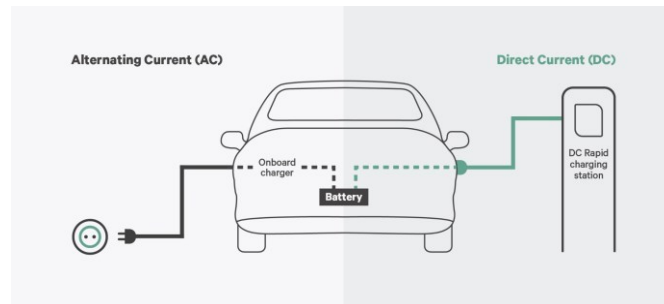
2.1.3 La càrrega de vehicles elèctrics

De manera general els vehicles es poden carregar de manera residencial al domicili o bé fora d'aquesta a estacionaments i àrees de servei públiques o privades que comptin amb la infraestructura necessària. El principi de funcionament del procés de càrrega d'una bateria es basa en aplicar una font de tensió continua (DC) als seus elèctrodes provocant la mobilitat dels electrons i ions de liti del càtode a l'ànode, com hem explicat a l'apartat anterior.

A la pràctica, aquesta font de tensió es pot aplicar de diverses maneres i es poden aplicar mètodes de càrrega amb més o menys potència, variant així el temps de recàrrega en cada cas. Es poden distingir dos casos de manera general, el vehicle

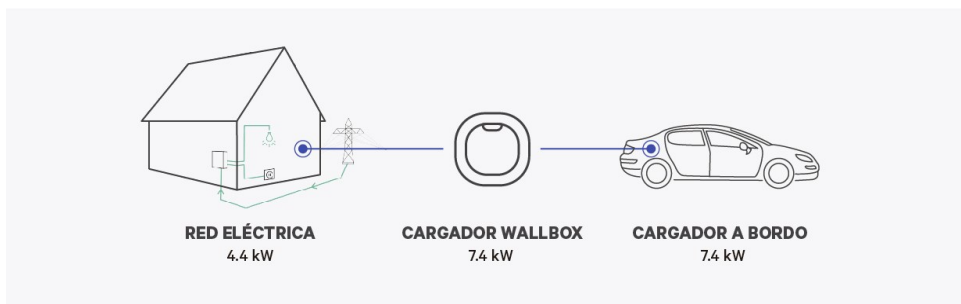
²⁷ Font: (Armand et al. 2020)

rep corrent altern (AC) o bé el vehicle rep corrent continu (DC), també conegut com càrrega ràpida.



IL·LUSTRACIÓ 23. TIPUS DE CÀRREGA PER EVs²⁸

En la càrrega de vehicles elèctrics, existeixen una sèrie de factors que afecten a la velocitat de càrrega dels diferents EV. Per tal de carregar un vehicle elèctric hem de seguir una cadena de blocs que determinarà quina és la potència de càrrega del EV i que comença des de la xarxa elèctrica. El temps de recàrrega d'un EV concret serà doncs el quocient entre la potència de càrrega i la capacitat de la bateria expressada en [kW]. La potència de càrrega serà la del element més dèbil de la cadena:



IL·LUSTRACIÓ 24. ESQUEMA DE CÀRREGA D'UN EV²⁹

Per exemple, suposant que tenim un EV amb una capacitat de bateria de 30 kW que té un OBC(On-board Charger) que pot entregar una potència màxima de 7,4 kW, connectat a un carregador de 7,4 kW que a la vegada està connectat a una instal·lació que pot entregar una potència màxima de 4,4kW, la potència de càrrega ve limitada per la instal·lació i serà de 4,4 kW donant un temps de recàrrega d'aproximadament 7 hores(Wallbox 2020).

²⁸ Font: (Wallbox 2020)

²⁹ Font: (Wallbox 2020)



IL·LUSTRACIÓ 25. CÀLCUL DEL TEMPS DE CÀRREGA D'UN EV³⁰

2.1.3.1 Terminologia de la infraestructura de càrrega

Dins de la indústria de la càrrega de vehicles elèctrics existeixen certes terminologies que es bo conèixer prèviament a l'anàlisi de cada sistema. Algunes de les definicions o conceptes més important dins d'aquest marc són les següents («Alternative Fuels Data Center: Developing Infrastructure to Charge Plug-In Electric Vehicles» 2020):

- ✓ **EVSE(Electric Vehicle Supply Equipment):** EVSE és el que es coneix en la indústria com la tecnologia que permet el subministrament energètic a un PEV(Plug-in Electric Vehicle). Es tracta d'equipament que només permet el subministrament a un sol EV a la vegada.
- ✓ **Estació de càrrega:** Una estació de càrrega és l'acumulació d'un o més EVSE a un punt concret. Es considera una estació de càrrega qualsevol ubicació que acumuli un o més EVSE, com per exemple podria ser el garatge d'un domicili o bé l'estacionament d'un centre comercial.
- ✓ **Connector:** Es tracta del cable del que disposa un PEV per tal de carregar-se. Un EVSE, pot tenir múltiples connectors, així com també pot tenir múltiples tipus de connectors, com ara CHAdeMO(Charge de Move) o CCS(Combined Charging System).

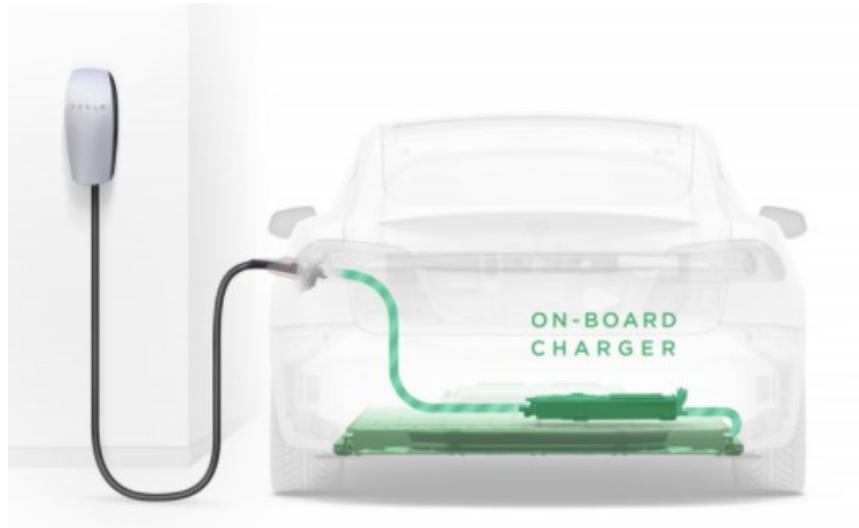
2.1.3.2 Connexió a corrent altern (AC), Càrrega lenta i semi-lenta

Els mètodes que permeten carregar EV a partir de l'OBC són els de càrrega lenta i semi-lenta. Quan s'endolla un cotxe elèctric per tal de carregar-lo, generalment rep corrent altern (AC). En canvi les bateries necessiten corrent continu (DC) per tal d'emmagatzemar energia. És per això que és necessari incorporar als vehicles carregadors capaços de modificar el corrent altern en corrent continu. Aquests dispositius es coneixen com a convertidors en l'electrònica de potència (PE).

La càrrega lenta és la més comuna i la més utilitzada pels usuaris a nivell domèstic. Tots els EV tenen la opció de carregar d'aquesta manera. A la il·lustració 26 podem veure gràficament el procés. El cotxe és endollat a una estació

³⁰ Font: (Wallbox 2020)

domèstica de càrrega lenta. El carregador transforma el corrent altern en continu i permet carregar el “battery-pack” del vehicle. La opció de càrrega lenta té una duració per càrrega completa del EV de 6-8 hores.



IL·LUSTRACIÓ 26. ESQUEMA PROCÉS DE CÀRREGA AMB OBC³¹

Una altra opció de càrrega mitjançant corrent altern és la càrrega semi-lenta que acostuma a tenir un temps de recàrrega de unes poques hores (2-3 hores). Aquest mètode és més adequat per ubicacions públiques com estacionaments de centre comercial o del lloc de feina dels usuaris. Això permet als usuaris carregar el vehicle mentre poden aprofitar el temps per la realització d'altres activitats. Normalment, l'usuari paga per l'electricitat usada en la recàrrega mitjançant un sistema integrat de pagament en l'estació. A la següent il·lustració podem veure'n un exemple que també usará el OBC del vehicle.

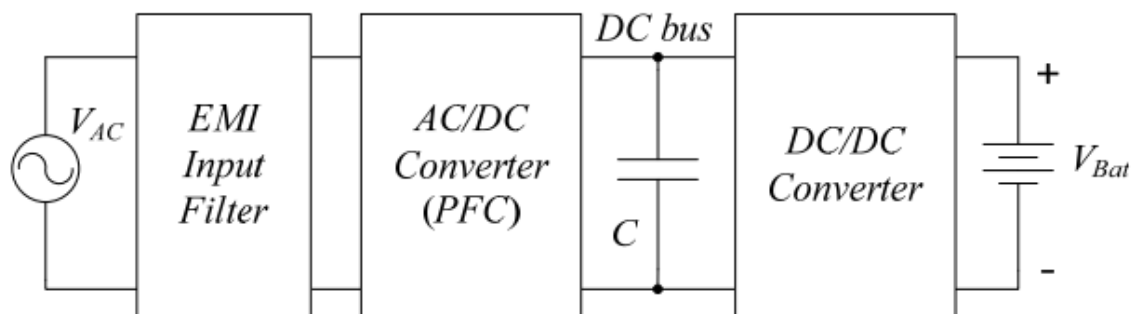
³¹ Font: (Tesla 2020)



IL·LUSTRACIÓ 27. CÀRREGA SEMI-LENTA³²

2.1.3.2.1 Carregador incorporat (OBC)

Per tal de carregar efectivament la bateria el on-board charger consta de diverses parts, cadascuna amb la seva funcionalitat. Els blocs constituents d'aquest tipus de carregadors els podem veure a la següent il·lustració.



IL·LUSTRACIÓ 28. ESQUEMA D'UN OBC³³

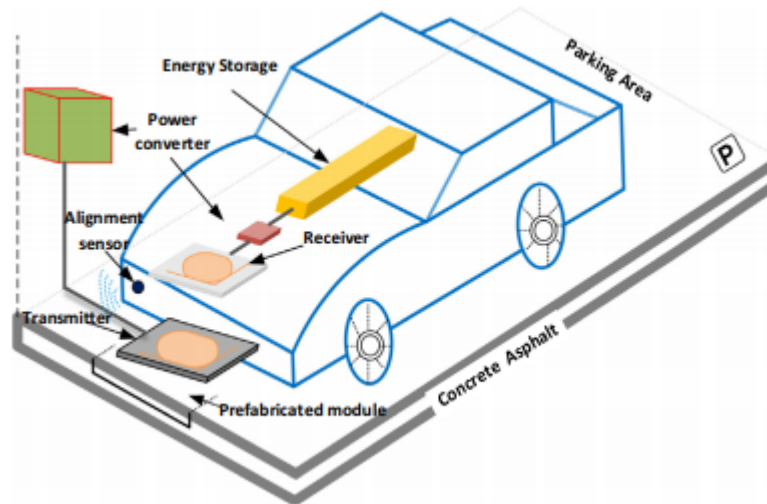
Consta d'una primera etapa amb un filtre conegut com a EMI filter (Electromagnetic Interference Filter) que s'encarrega de la supressió de la interferència provinent de la xarxa. Una cop la senyal està filtrada existeix una etapa en la que trobem un rectificador AC/DC de correcció del factor de potència que s'assegura que aquest sigui unitari (PFC) i a continuació un DC bus acompanyat d'un convertidor DC/DC per tal de controlar la corrent continu (DC) que es proporciona al "battery-pack" en funció del seu estat de càrrega (SoC)(Marcos 2015).

³² Font: (Autobild 2020)

³³ Font: (Marcos 2015)

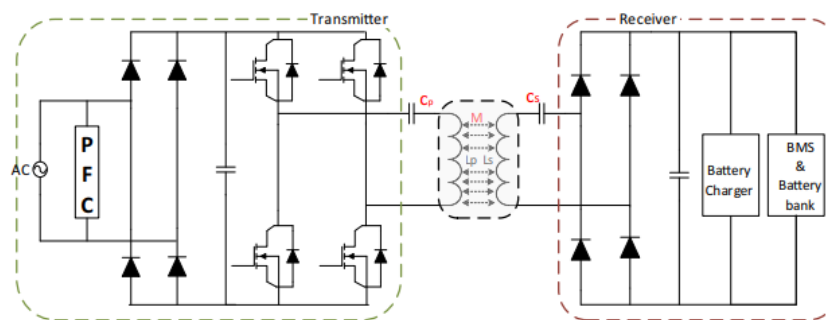
2.1.3.2 Càrrega per Inducció estàtica (ICPT)

La transferència d'energia mitjançant l'acoblament inductiu (ICPT) és una tecnologia que forma part del grup de sistemes estàtics de càrrega de vehicles elèctrics sense fils (S-WEVCS) que a la vegada forma part dels sistemes de càrrega de vehicles elèctrics sense fils (WEVCS).



IL·LUSTRACIÓ 29. ESQUEMA DE CÀRREGA ESTÀTICA PER INDUCCIÓ³⁴

A l'anterior figura podem veure l'esquema amb les parts més importants d'un S-WEVCS. La bobina principal es troba inserida sota terra equipada amb un convertidor de potència. La bobina receptora, en canvi, es troba al vehicle, i pot estar situada a la part davantera central o posterior d'aquest. L'energia rebuda per la bobina es transforma mitjançant l'OBC per tal de poder recarregar el "battery-pack" del vehicle.



IL·LUSTRACIÓ 30. ESQUEMA D'UN SISTEMA DE TRANSFERÈNCIA D'ENERGIA PER INDUCCIÓ³⁵

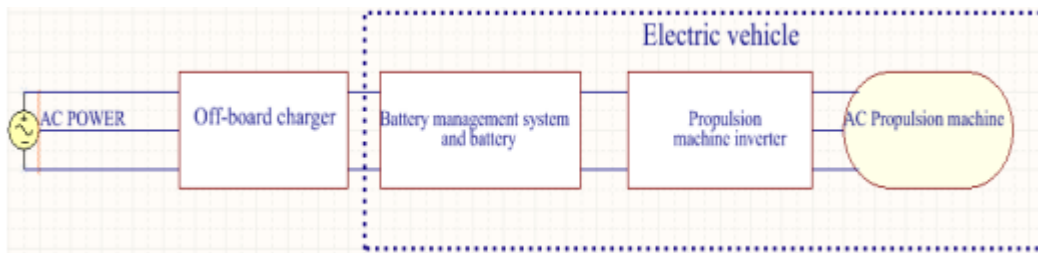
³⁴ Font: (Panchal, Stegen y Lu 2018)

³⁵ Font: (Panchal, Stegen y Lu 2018)

La velocitat de càrrega per aquest mètode dependrà de la potència entregada pel convertidor de potència exterior, la mida de la bobina principal, i la distància entre ambdues bobines que acostuma a ser d'entre 150-300mm. Aquest equipament de recàrrega pot ser instal·lat en domicilis, estacionaments, centres comercials, supermercats, etc. El preu d'aquestes instal·lacions acostuma a suposar un cost de 2700-13000 USD per a nivells de càrrega entres els 3,3-7,2 kW (Panchal, Stegen y Lu 2018).

2.1.3.3 Connexió a corrent directa (DC) o càrrega ràpida

Els carregadors de càrrega continua a diferència dels de càrrega lenta i semi-lenta, reben corrent continu DC. La idea d'eliminar els prolongats temps de recàrrega dels EV ha inspirat la recerca en aquesta direcció per tal d'aconseguir un sistema que pugui ser equiparable al repostatge d'un ICE. Donat que aquest mètode de recàrrega proporciona corrent continu al EV requereix d'una etapa d'equipament exterior al vehicle per tal de poder abastir-lo.



IL·LUSTRACIÓ 31. ESQUEMA DE CÀRREGA RÀPIDA³⁶

Aquesta etapa exterior és la que s'encarrega de la conversió AC/DC de la corrent aportada per la xarxa i d'elevat el voltatge per carregar les bateries en temps més reduïts. En aquest cas, el OBC és ignorat i les bateries reben l'energia directament del OFFBC. Els carregadors de càrrega ràpida permeten carregar els EV en finestres de temps que van de 20-30 minuts. Aquests sistemes són i seran de gran importància per a una major acceptació dels EV al mercat.



IL·LUSTRACIÓ 32. CÀRREGA RÀPIDA³⁷

³⁶ Font: (Angelov, Andreev y Hinov 2018)

³⁷ Font: (ABB 2020)

2.1.3.4 Estàndards

Quan parlem de la càrrega de vehicles elèctrics, existeixen algunes organitzacions que donen definicions i classificacions dels diferents mètodes de càrrega que existeixen en funció de temps, voltatge, connectors i altres factors. En aquest apartat parlarem de dues de les organitzacions que proveeixen els estàndards del sector considerats més importants en la matèria, IEC i SAE.

2.1.3.4.1 IEC

Per una banda la International Electrotechnical Commission té tres estàndards d'especial importància en els que es defineixen diferents aspectes:

- ✓ **IEC 61851-1:** En aquest estàndard es defineixen els modes de càrrega i es defineixen les característiques i condicions d'operació del EVSE i la connexió al vehicle
- ✓ **IEC 62196-1:** Aquest estàndard defineix principalment cables, endolls i connectors per a EVs i PHEVs.
- ✓ **IEC 61980-1:** Aquest estàndard està dedicat a l'equipament necessari per tal de transferir energia PEVs mitjançant mètodes wireless.

Entrant més en detall en l'estàndard IEC 61851-1 podem veure que es defineixen quatre grans modes de càrrega per a EV (Marcos 2015):

- **Mode 1:** Es tracta del mètode més bàsic que pot ser empleat mitjançant un sistema d'una o tres fases amb un voltatge RMS màxim de $250 V_{RMS}$ per a una sola fase i $480 V_{RMS}$ en el cas trifàsic. En termes de corrent, la màxima permesa és de $16 A_{RMS}$ sense exigència d'un connector concret. Cal remarcar que aquest mode no està permès als Estats Units.
- **Mode 2:** El mode 2 també pot ser empleat mitjançant sistemes d'una o tres fases i amb els mateixos voltatges que el mode 1 de $250 V_{RMS}$ i $480 V_{RMS}$ respectivament. En aquest cas la corrent màxima permesa és de $32 A$ i tampoc es requereix un connector específic.
- **Mode 3:** En el mode 3 el EV es connecta a la xarxa mitjançant un EVSE. El corrent màxim pot estar en l'interval de $32-250 A_{RMS}$.
- **Mode 4:** El mode 4, altrament conegut com a càrrega ràpida, defineix que l'EV es connecta a la xarxa mitjançant un off-board charger que proporciona una connexió DC amb una corrent màxima de $400 A_{RMS}$.

Vistos els quatre modes definits per IEC 61851-1, cal dir que els modes 1 i 2 estan considerats com a càrrega lenta i s'espera la seva presència en domicilis per tal de permetre a l'usuari carregar a les nits en una franja horària de més baixa demanda. En canvi, el mode 3 està considerat de càrrega semi-lenta i és més comuna la seva presència en estacionaments, centres comercials, etc.

Finalment el mode 4 es coneix com a càrrega ràpida o ultra-ràpida i té el potencial de carregar un EV en pocs minuts. La seva presència seria clau en àrees de servei d'autopistes permetent recàrregues ràpides per viatge més llargs.

	Velocitat	Corrent	Fases	Voltatge[V _{RMS}]	Corrent[A _{RMS}]
Mode 1	Lent	AC	1/3	250/480	16
Mode 2	Lent	AC	1/3	250/480	32
Mode 3	Semi-lent	AC	1/3	-	32-250
Mode 4	Ràpid/Ultra-ràpid	DC	1	-	400

TAULA 6. RESUM DELS MODES DE CÀRREGA³⁸

2.1.3.4.2 SAE

D'altre banda la Society for Automotive Engineers proporciona el seu propi estàndard que és d'aplicació als EE.UU. L'estàndard SAE J1772 defineix tres nivells de càrrega per als EV classificats en funció de la velocitat de càrrega dels vehicles. Essent els esmentats nivells els següents («Alternative Fuels Data Center: Developing Infrastructure to Charge Plug-In Electric Vehicles» 2020):

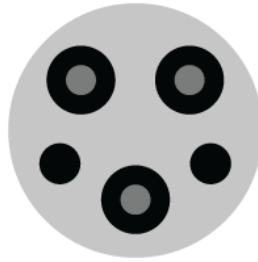
- **Level 1:** El nivell 1 proporciona una recàrrega a partir d'un voltatge de 120 V de corrent altern. La gran majoria d'EV són compatibles amb aquest nivell de càrrega i per tant venen equipats amb un cable del nivell 1 que en un extrem té un connector NEMA, de manera que no es requereix instrumentació addicional per connectar-lo a la xarxa, i en l'altre extrem té un connector estàndard SAE J1772 que es connecta al vehicle. Es tracta d'un tipus de càrrega utilitzat majoritàriament a nivell domiciliari i que representa menys d'un 5% de les estacions públiques de recàrrega. La velocitat de recàrrega és d'entre 3,2-8 km/h.



IL·LUSTRACIÓ 33. CONNECTOR NEMA³⁹

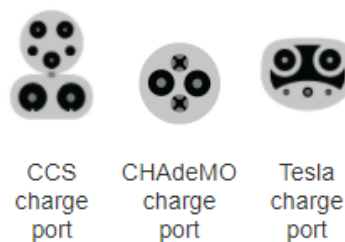
³⁸ Font: (Marcos 2015)

³⁹ Font: (Wikipedia 2020)



IL·LUSTRACIÓ 34. CONNECTOR J1772⁴⁰

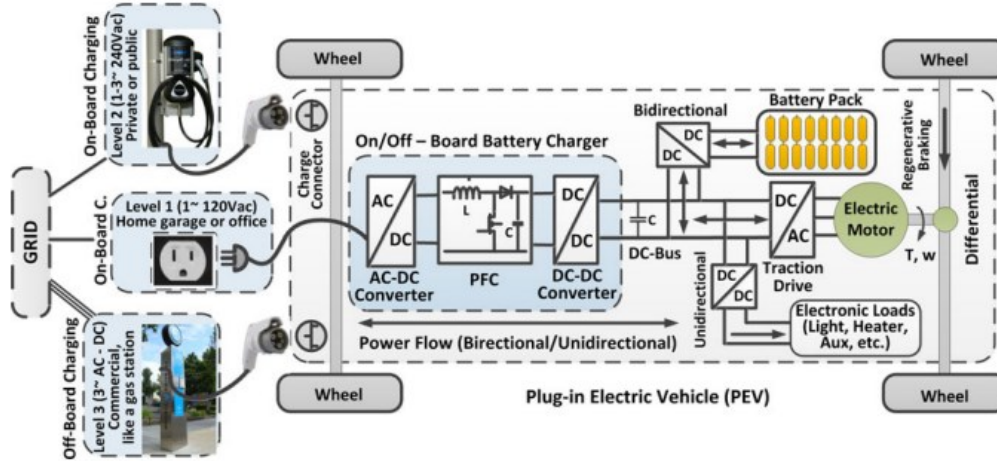
- **Level 2:** El nivell dos ofereix una càrrega del vehicle a 240 V i 208 V de corrent altern. Com el nivell 1, també es tracta d'un mètode de càrrega utilitzat majoritàriament de manera residencial ja que té la capacitat de carregar la bateria de l'EV durant la nit. Aquesta opció pot operar fins a 80 A i 19,2 kW de potència, tot i que la majoria de equipament domiciliari opera a una potència menor. La majoria de l'equipament opera a 30 A donant una potència de 7,2 kW. Utilitza el mateix connector J1772 que el nivell 1. Representa el 80% dels punts de càrrega públics. Té una velocitat de recàrrega d'entre 16-32 km/h.
- **Level 3:** El nivell 3, conegut com a DC Fast Charging, és un equipament que funciona amb 208/480 V de corrent altern i que permet la càrrega ràpida dels EV. És un tipus d'equipament útil per a àrees de servei en trajectes que requereixen més autonomia. Representa un 15% dels punts de càrrega públics. Existeixen tres tipus de càrrega ràpida en funció del connector utilitzat: CCS, CHAdeMO o Tesla Port.



IL·LUSTRACIÓ 35. CONNECTORS CSS, CHADEMO I TESLA⁴¹

⁴⁰ Font: («Alternative Fuels Data Center: Developing Infrastructure to Charge Plug-In Electric Vehicles» 2020)

⁴¹ Font: («Alternative Fuels Data Center: Developing Infrastructure to Charge Plug-In Electric Vehicles» 2020)



IL·LUSTRACIÓ 36. ESQUEMA GRÀFIC DELS NIVELLS DE CÀRREGA⁴²

	Corrent	Voltatge[V]	Ús de OBC	Velocitat de recàrrega[km/h]	Connector/s
Level 1	AC	120	Sí	3,2-8	J1772
Level 2	AC	240	Sí	16-32	J1772
Level 3	DC	208/400	No	290-386	CCS CHAdEMO Tesla Charge Port

TAULA 7. RESUM DELS NIVELLS DE CÀRREGA⁴³

⁴² Font: (Yilmaz y Krein 2013)

⁴³ Font: («Alternative Fuels Data Center: Developing Infrastructure to Charge Plug-In Electric Vehicles» 2020)

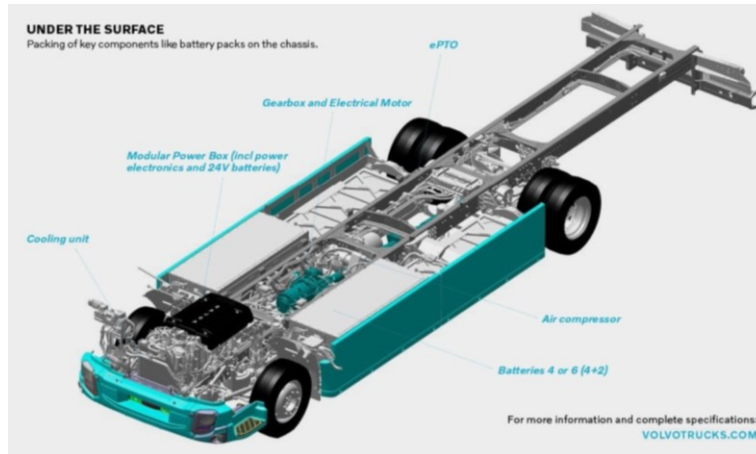
2.1.4 Mètodes de càrrega en moviment

Els mètodes de càrrega en moviment es poden englobar sota el concepte de eRoads (Electric Roads) també coneguts com a ERS (Electric Road Systems). Les eRoads són una solució tecnològica per tal de abastir les bateries dels EVs de manera dinàmica i que té el potencial de reduir la dependència dels combustibles fòssils i les bateries de gran capacitat, contribuir a la descarbonització del sector del transport i reduir la contaminació acústica i de l'aire en àrees urbanes (Gustavsson, Hacker y Helms 2019). El fonament principal d'aquesta tecnologia és que els EVs tinguin la opció d'utilitzar l'energia directament subministrada per la xarxa en comptes de haver de dependre en el "battery-pack" incorporat en el propi vehicle. Una definició de ERS podria ser:

"ERS is defined as a system enabling power transfer from the road to the vehicle while the vehicle is in motion and could be achieved through different power transfer technologies such as rail, overhead line, and wireless solutions." (Gustavsson, Hacker y Helms 2019).

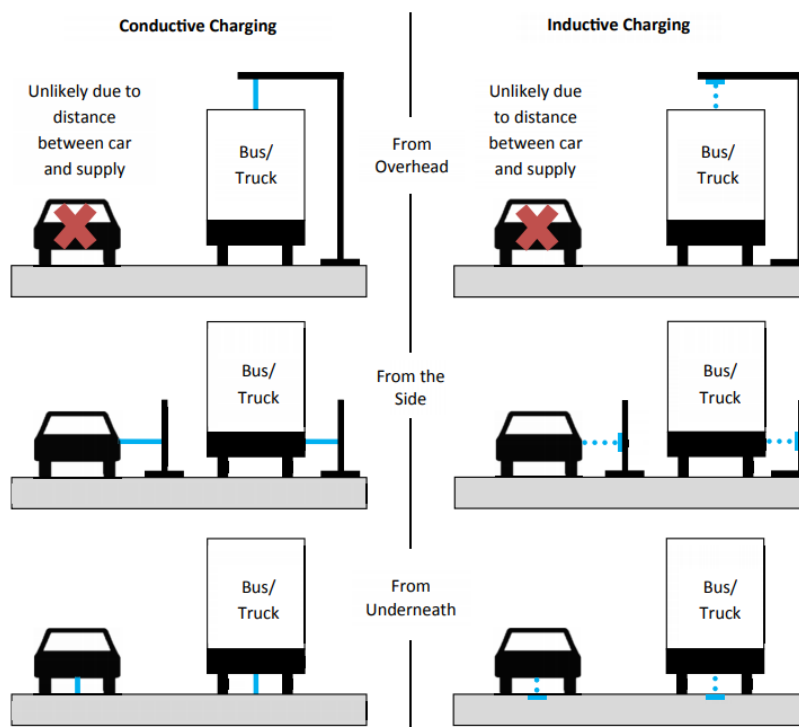
El fet que podria donar lloc a un canvi substancial en el sector del transport seria la instal·lació de sistemes de càrrega englobats dins el concepte de eRoad als enllaços entre les àrees més densament poblades d'un territori. D'aquesta manera, seria possible utilitzar la tecnologia eRoad per a trajectes que requereixen gran autonomia i reduir la mida de les bateries dels EVs. Això seria possible degut a que els EV únicament haurien de tenir una bateria suficientment energètica per arribar a la infraestructura de càrrega més pròxima i no per arribar a la destinació final.

Val a dir que moltes de les solucions han estat originalment concebudes per a la electrificació de HDV (Heavy Duty Vehicles) per tal de donar un impuls a la descarbonització del sector del transport i no pas per a turismes. Tot i així, recentment han sorgit solucions tecnològiques que han eixamplat l'abast de vehicles que poden carregar fent que aquesta tecnologia sigui menys específica i poc a poc també es concebi per a carregar turismes. En el cas dels HDV la possibilitat d'aplicar una reducció a la capacitat de les bateries guanya encara més importància ja que aquests vehicles necessiten bateries amb capacitats molt elevades donat el seu pes i a les grans distàncies a recórrer. Per exemple, els camions elèctrics Volvo compten amb la possibilitat d'escollir 4 o 6 "battery-packs" cadascun amb 50 kWh de capacitat, donant una capacitat total de 200-300kWh. A la següent figura podem veure un exemple de HDV electrificat pertanyent al fabricant Volvo.



IL·LUSTRACIÓ 37. ESQUEMA D'UN EHDV⁴⁴

La càrrega de vehicles elèctrics en moviment gaudeix d'una gran diversitat en quant al mètode en que es pot dur a terme. Diferenciarem entre les que exigeixen un contacte directe i les que no, o bé distingirem els diferents tipus d'alternatives a partir del seu principi de funcionament. Primàriament s'estan fent esforços en desenvolupar solucions tecnològiques per a eRoads en l'àmbit de la conducció i la inducció. A la següent figura es poden veure diferents conceptes d'aquestes dues opcions en funció de la configuració en la que s'abasteix al vehicle.



IL·LUSTRACIÓ 38. RESUM DELS CONCEPTES DE SISTEMES DE CÀRREGA EN MOVIMENT⁴⁵

⁴⁴ Font: (Volvo 2019)

⁴⁵ Font: (Connolly 2017)

Per a l'opció de la conducció existeix un contacte físic entre la eRoad i el vehicle de manera similar a altres vehicles propulsats de manera elèctrica com ara els trams. Per tant, es tracta de una tecnologia en estat madur i que requeriria poques modificacions. L'avantatge d'aquests sistemes és que els rails i les línies superiors de conducció són més econòmiques i poden transferir potències més elevades. No obstant, aquestes solucions són més intrusives i suposen possibles riscos per a vianants.

En canvi, en la inducció no existeix contacte físic ja que l'electricitat es transfereix al vehicle mitjançant un camp magnètic. Comparativament és una tecnologia menys madura que la conducció (Connolly 2017). A diferència dels sistemes per conducció, és menys intrusiu i no afecta al manteniment de la carretera però es requereixen transmissors de gran mida per assolir les potències requerides. Els camps magnètics també poden suposar perills per a la salut.

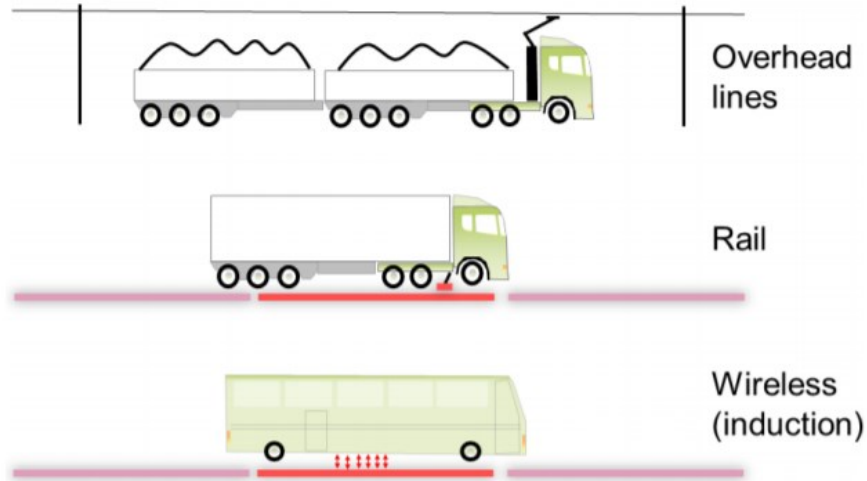
2.1.4.1 Conceptes bàsics i subsistemes

Actualment, existeixen tres conceptes principals en els que es basen les tecnologies ERS. A conèixer: línies de conducció, rails conductors en la superfície de la carretera i sistemes d'inducció també coneguts com a D-WEVCS (Dynamic-Wireless Electric Vehicle Solutions). Cadascun d'aquests conceptes té les seves avantatges i desavantatges com a solucions ERS i estan sent posades a proves per diversos actors. (Gustavsson, Hacker y Helms 2019)

Les línies de conducció són una solució tecnològica que utilitza línies elèctriques conductores situades sobre el vehicle per tal de transmetre energia (aquestes línies també es coneixen com a catenàries). L'energia transferida és rebuda pel vehicle mitjançant un dispositiu conegut com a pantògraf que per força s'instal·la a la part superior del vehicle i que al establir contacte amb les catenàries es capaç de rebre energia.

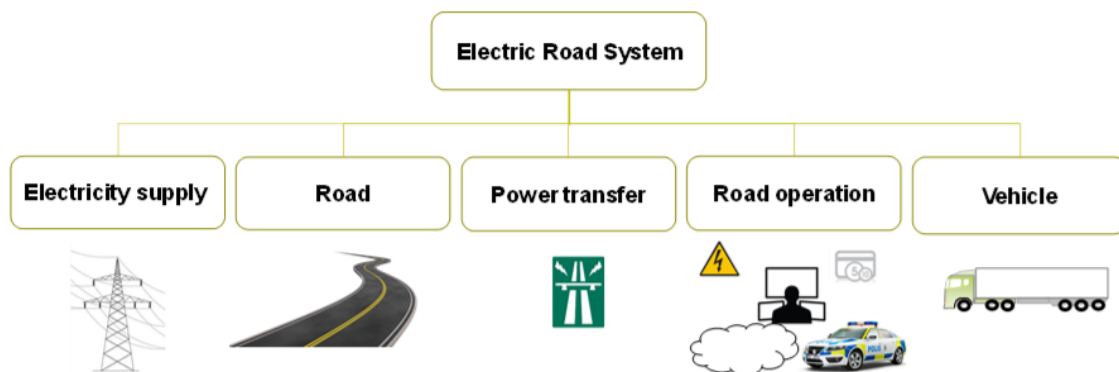
D'altra banda, els rails conductors es troben a la superfície de la carretera i permeten la transferència d'energia amb el vehicle mitjançant un braç situat a la part inferior del vehicle que entra en contacte amb el rail de manera automàtica.

Per últim, els sistemes d'inducció són aquells que transfereixen energia al vehicle mitjançant el fenomen de la inducció. Una bobina principal situada a la superfície genera un camp magnètic no constant que en travessar la bobina secundària instal·lada al vehicle genera una corrent en aquesta.



IL·LUSTRACIÓ 39. CONCEPTES BÀSICS DELS ERS⁴⁶

Més enllà del mètode en el que l'energia és transferida, existeixen una sèrie de subsistemes que formen part de les solucions ERS: la xarxa, carretera, transferència d'energia, operació de l'ERS, i finalment el vehicle.



IL·LUSTRACIÓ 40. SUBSISTEMES DELS ERS⁴⁷

La xarxa és el subsistema que engloba la transmissió i distribució de l'electricitat. Essent la transmissió el mètode mitjançant el qual l'electricitat es transporta des dels punts de generació als punts de consum i la distribució és com aquesta electricitat navega la xarxa que permet arribar als subsistemes de transferència d'energia.

La carretera és el subsistema que consisteix en el paviment i components auxiliars com barreres, senyals de tràfic, etc. El paviment inclou les línies de marca i el cos estructural sobre el que es desplaça el vehicle.

El subsistema de transferència d'energia engloba tres components: el sistema de transferència d'energia de la carretera, el del vehicle i finalment el control. El

⁴⁶ Font: (Gustavsson, Hacker y Helms 2019)

⁴⁷ Font: (Gustavsson, Hacker y Helms 2019)

sistema de transferència d'energia de la carretera és l'encarregat de la detecció del vehicle i de transferir-li energia. El sistema de transferència d'energia del vehicle és el que s'encarrega d'activar un receptor d'aquesta energia de manera segura i mesura l'energia rebuda. El sistema de control monitoritza l'energia rebuda i com s'administra al "battery-pack".

El subsistema d'operació del ERS controla la gestió de l'energia del sistema complet, gestiona l'accés a la carretera dels vehicles mitjançant la seva identificació i també s'encarrega de la facturació del servei als usuaris.

Finalment, el vehicle és el subsistema que inclou els components necessaris per tenir la possibilitat de rebre energia del sistema ERS i transformar-la per tal de poder propulsar-se.

2.1.4.2 Regulació i Estàndards

La introducció d'una tecnologia tant disruptiva com són els ERS a la infraestructura de transport suposarà inevitablement haver de superar nombrosos reptes en relació a la regulació existent i estàndards.

D'una banda, la principal preocupació per a les solucions per inducció, és l'impacte de l'exposició electromagnètica sobre la salut humana. L'exposició humana a les ones electromagnètiques està estandarditzada per el Institute of Electrical and Electronical Engineers (IEEE) i la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Tot i que estudis d'ambdues organitzacions han recalcat la falta de proves que demostrin que l'exposició a EMF provoqui càncer, si que pot provocar un increment de la temperatura corporal, estimular nervis i teixit muscular. Els estàndards principals relacionats amb aquesta temàtica són (Bateman et al. 2018):

- ✓ ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields. (1 Hz-100kHz)(ICNIRP 2010).
- ✓ IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. (IEEE 2006).
- ✓ IEC62311: Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restriction for electromagnetic fields (0Hz to 300 GHz)(Bateman et al. 2018).
- ✓ IEC62233: Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure. (Bateman et al. 2018).
- ✓ 1999/519/EC, "Council Recommendation of 12th July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0hz to 300Ghz), Official Journal if the European Communities No. L 199, 30th July 1999, pp. 59–70190.(CEU 1999).

D'altra banda per a les solucions conductives, els principals aspectes a considerar és l'exposició de cables, rails o components conductors. És probable que les alternatives per conducció es puguin adherir als estàndards ja existents per a rails i catenàries. Les solucions només haurien d'estar actives quan un vehicle les està usant i no hi ha possibilitat de contacte entre les persones i el sistema. Les línies de conducció han d'estar a una altura suficient per estar a una distància prudencial dels humans i la part superior del vehicle.

2.1.4.3 Tecnologies ERS

Existeixen diversos projectes que involucren les solucions tecnològiques esmentades que han estat posats a prova o bé que estan actualment en fase d'investigació. En aquest apartat es comentaran les més conegudes per tal de donar una visió holística de les tecnologies. A les següents taules es pot veure un resum de les tecnologies en desenvolupament tant en l'àmbit de la conducció com en el de la inducció i el seu estat.

2.1.4.3.1 Conducció

Com s'ha comentat, les tecnologies ERS basades en la conducció són aquelles que exigeixen el contacte físic directe entre components per tal de transmetre energia, ja sigui per sobre el vehicle, per sota o de manera lateral. Les tecnologies que es tindran en compte es presenten a la següent taula i són les que es consideren més desenvolupades en l'actualitat.

Nom	Empresa/Universitat	Connexió i Vehicle	Estat	País
eHighway	Siemens, Scania	Superior per a camions	Demostracions a Suècia, Estats Units i Alemanya	Suècia, Estats Units i Alemanya
450 kW ERS	Honda	Lateral per a turismes i camions	Demostracions en laboratori	Japó
Slide-in	Alstom, Volvo	Inferior per a tot tipus de vehicles	Demostracions a Suècia	Suècia
Elonroad	Swedish Transport Administration, Lund University of Technology	Inferior per a tot tipus de vehicles	Demostracions a Suècia	Suècia
eRoadArlanda	Elways	Inferior per a tot tipus de vehicles	Demostracions a Suècia	Suècia

TAULA 8. RESUM ALTERNATIVES PER CONDUCCIÓ⁴⁸

⁴⁸ Font: (Connolly 2017)

2.1.4.3.1.1 Siemens eHighway

eHighway és una solució tecnològica desenvolupada per Siemens que permet la càrrega de vehicles elèctrics mitjançant línies de conducció sobre el vehicle que permeten la connexió d'un pantògraf a velocitats de fins a 80 km/h. La connexió directa a les línies de conducció permet una eficiència del 80-85% que és molt més elevada que la dels motors dièsel convencionals que tenen una eficiència que és aproximadament la meitat. Aquesta tecnologia també permet l'ús de la frenada regenerativa i fins i tot la transmissió d'electricitat a la xarxa que podria utilitzar-se per a l'abastiment d'altres vehicles connectats simultàniament al mateix ERS. Donat que les línies de conducció es troben per sobre del vehicle, aquesta tecnologia no afecta a la superfície de la carretera i gaudeix d'una minimització de les molèsties que la seva instal·lació pot causar (Siemens 2017).

La tecnologia eHighway consta de tres elements importants a considerar: la transmissió i distribució de l'energia, el pantògraf, i el mode de conducció híbrid. La transmissió i distribució de l'energia està garantida gràcies a les subestacions que es col·locarien als costats de les eHighways i a les quals estarien connectades les dues línies de conducció necessàries per abastir el vehicle.



IL·LUSTRACIÓ 41. LÍNIES DE CONDUCCIÓ⁴⁹

El pantògraf actiu es l'element més important d'aquest tipus de ERS ja que és el que permet la connexió i desconexió del vehicle al sistema a les velocitats esmentades. Aquest element transfereix l'energia rebuda directament al motor elèctric del vehicle i incorpora una tecnologia de sensors que permet l'ajustament de la seva posició respecte les línies de conducció davant moviments laterals o canvis de nivell al terreny.

⁴⁹ Font: (Siemens 2017)



IL·LUSTRACIÓ 42. PANTÒGRAF⁵⁰

El mode d'operació Hybrid Drive permet que el vehicle operi de manera totalment elèctrica mentre estigui connectat al sistema a la vegada que permet la flexibilitat de canviar a mode híbrid per avançar i assegurar l'autonomia del vehicle als trams que no disposen d'infraestructura elèctrica.



IL·LUSTRACIÓ 43. MODE HÍBRID⁵¹

Actualment aquesta tecnologia ha estat provada com a concepte des de l'any 2010 mitjançant un tram de prova de 2.1 km i com a solució real des de Juny de 2016 a partir d'un tram de 2 km a l'autopista E16 del nord d'Estocolm en el que viatgen camions del fabricant Scania transportant càrregues de clients reals. Aquesta prova pretén avaluar les opcions i l'operativa real de les solucions ERS prèviament a la seva incorporació al teixit global de carreteres. Altres demostracions han tingut lloc, per exemple, al sud de Califòrnia als Estats units on la principal motivació és reduir la intensa contaminació de l'aire de la regió deguda a un gran volum de transport entre els ports de Los Angeles i Long Beach.

⁵⁰ Font: (Siemens 2017)

⁵¹ Font: (Siemens 2017)



IL·LUSTRACIÓ 44. DEMOSTRACIONS A SUÈCIA⁵²

Aquestes demostracions del sistema han servit per tal de redissenyar alguns components i mesurar la maduresa de la tecnologia, de la que es creu que el nou sistema té un nivell TRL 6 (Gustavson y Lindgren 2020).

Eficiència	85%
Cost	2.2M €/km
Potència	500 kW
Velocitat	80 km/h
Compatibilitat	Parcial
Maduresa	TRL 6

TAULA 9. FACTORS EHIGHWAY⁵³

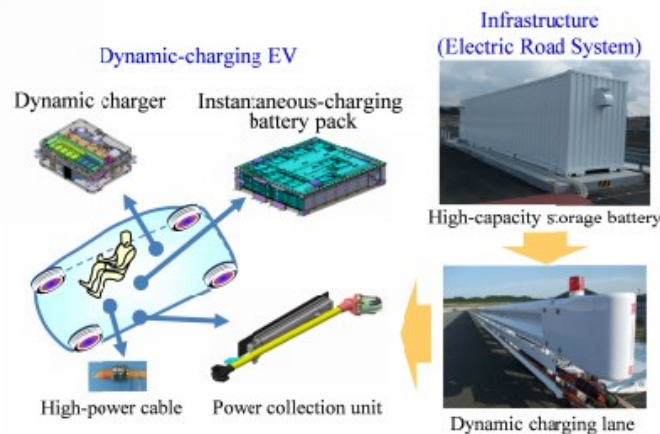
⁵² Font: (Siemens 2017)

⁵³ Font: (Bateman et al. 2018)

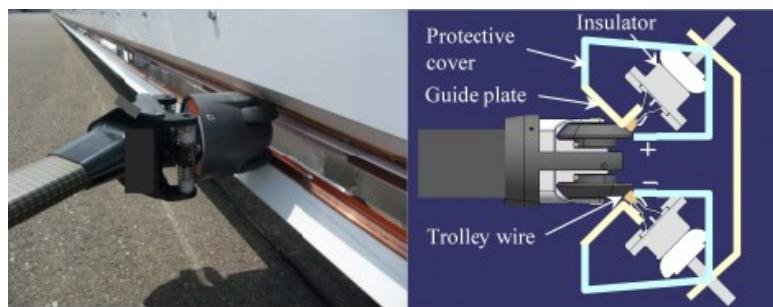
2.1.4.3.1.2 Honda 450 kW Conductive ERS

Honda ha presentat una tecnologia de càrrega dinàmica en la que permet carregar el vehicle per conducció lateral. L'objectiu d'aquest sistema és la promoció de la substitució dels ICE i aconseguir una societat lliure de carboni sense haver de lidiar amb les problemàtiques que l'augment de la capacitat de les bateries comporta, com ara la necessitat d'assegurar matèries primes i recursos (Tajima 2020).

Aquest mètode consta bàsicament de bateries d'alta capacitat on s'emmagatzema l'energia necessària per abastir el vehicle, un col·lector d'aquesta energia en forma de braç mecànic i finalment el carril situat al lateral de la carretera que permet la càrrega en moviment. Les bateries d'alta capacitat proporcionen corrent DC al carril de càrrega lateral que a la vegada la transmet al vehicle mitjançant el col·lector.



IL·LUSTRACIÓ 45. COMPONENTS DEL SISTEMA HONDA⁵⁴



IL·LUSTRACIÓ 46. VISTA DE DETALL DEL CARRIL DE CÀRREGA⁵⁵

La potència màxima que el sistema pot donar es de 480 kW mitjançant un voltatge de 800 V i una corrent de 600 A. La distància entre el carril de càrrega i els vehicle

⁵⁴ Font: (Tajima 2020)

⁵⁵ Font: (Tajima 2019)

està en l'interval dels 0.1-1.3 m. A la següent taula podem veure un resum de les especificacions i de les diferents fases que aquest projecte ha passat.

	Type-0	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4
Vehicle					
Potència ERS	100 kW	100 kW	180 kW	450 kW	450 kW
Voltatge	375 V	375 V	600 V	750 V	750 V
Corrent	300 A	300 A	300 A	600 A	800 A
Distància	0.1-1.2 m	0.1-1.2 m	0.1-1.3 m	0.1-1.3 m	0.1-1.5 m
Velocitat	20 km/h	70 km/h	155 km/h	150 km/h	120 km/h
Llargada Carril	20 m	100 m	300 m	385 m	400 m

TAULA 10. TIPUS DE SISTEMES DESENVOLUPATS I PARÀMETRES⁵⁶

Amb aquestes especificacions, veiem que existeix un rati de 19:1 entre l'autonomia del vehicle i la llargada del carril de càrrega. Això significaria que es podrien eliminar els problemes d'autonomia amb aproximadament 3 km de carril de càrrega cada 52 km.

	EV		Camió Pesat EV
Velocitat mitja	100 km/h	200 km/h	80 km/h
Distància total	53 km		
Distància de càrrega	2.8 km	12.7 km	15.8 km
Distància sense càrrega	50.2 km	40.3 km	37.2 km
Capacitat mínima de la bateria	13 kWh	30 kWh	99 kWh

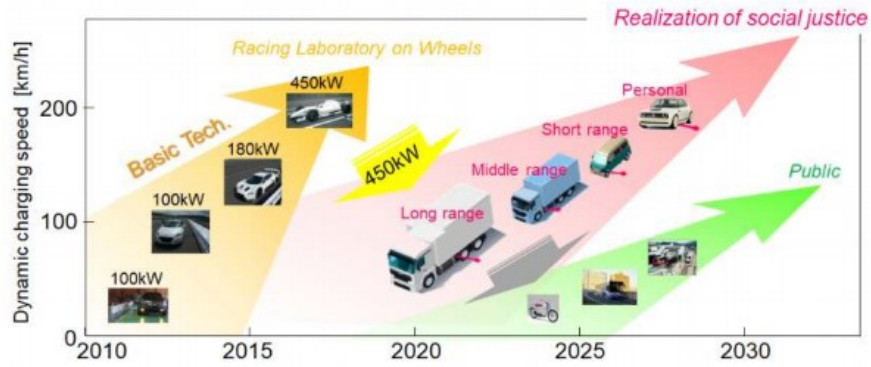
TAULA 11. DISTÀNCIA DE CÀRREGA DEL SISTEMA⁵⁷

Aquestes condicions semblen permetre la reducció considerable de la capacitat de les bateries, reduint el cost dels EV i ajudant a la disponibilitat dels recursos per seguir produint-les. També podria fer possible l'electrificació dels camions pesats que no era un dels objectius originals del projecte.

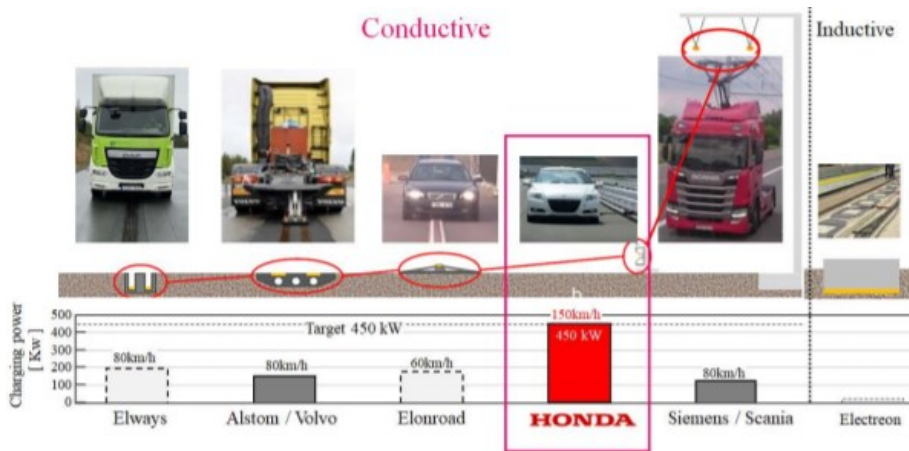
Els futurs desenvolupaments d'aquest projecte pretenen augmentar la velocitat fins els 200 km/h i tractar temes com la seguretat del sistema ERS.

⁵⁶ Font: (Tajima 2020)

⁵⁷ Font: (Tajima 2020)



IL·LUSTRACIÓ 47. PERSPECTIVES DE FUTUR DEL SISTEMA⁵⁸



IL·LUSTRACIÓ 48. COMPARATIVA AMB ALTRES SISTEMES⁵⁹

La tecnologia d'Honda està considerada com a nivell de maduresa TRL 4 quan s'analitza com a sistema, encara que alguns dels seus components tenen nivell TRL 5(Gustavson y Lindgren 2020).

Eficiència	95%
Cost	0.13 M €/km
Potència	450 kW
Velocitat	150 km/h
Compatibilitat	Total
Maduresa	TRL 4

TAULA 12. FACTORS HONDA⁶⁰

⁵⁸ Font: (Tajima 2020)

⁵⁹ Font: (Tajima 2020)

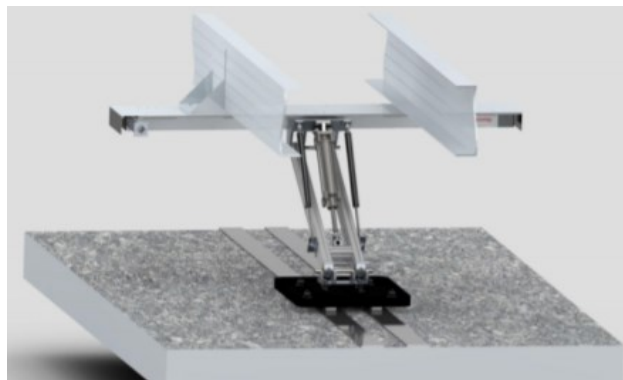
⁶⁰ Font: (Bateman et al. 2018)

2.1.4.3.1.3 Slide-in Conductive ERS

Slide-in conductive ERS és una solució proposada principalment per Volvo i Alstom que es basa en la ja ben establerta tecnologia d'Alstom anomenada APS (Alimentation Par le Sol) que s'usa en l'alimentació de trams en zones urbanes i que està present a diverses ciutats. Amb aquesta idea com a peça angular Volvo ha dissenyat un braç col·lector enfocats a camions pesats, però que també seria possible incorporar a turismes, que permet el moviment lateral adaptant-se als moviments del vehicle per tal de que es pugui aplicar aquesta tecnologia en forma d'ERS (Gustavsson, Hacker y Helms 2019).



IL·LUSTRACIÓ 49. CAMIÓ ADAPTAT A LA TECNOLOGIA APS⁶¹

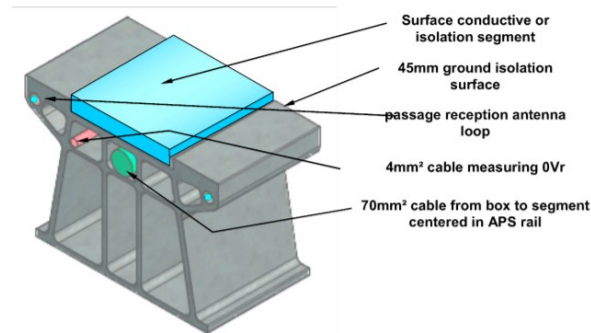


IL·LUSTRACIÓ 50. ESQUEMA DEL BRAÇ COL·LECTOR⁶²

⁶¹ Font: (Viktoría Swedish ICT; KTH; Volvo GTT; Scania CV; Lund University; The Swedish Transport Administration; Bombardier; Vattenfall 2013)

⁶² Font: (Viktoría Swedish ICT; KTH; Volvo GTT; Scania CV; Lund University; The Swedish Transport Administration; Bombardier; Vattenfall 2013)

La tecnologia APS es basa en un rail d'alimentació segmentat en diferents trams. L'idea és que només es subministra voltatge al tram de rail que està ocupat físicament per el vehicle que rep la càrrega, eliminant així el risc per a les persones. El tramvia, per a ser carregat té un col·lector situat a la part inferior que permet la càrrega mitjançant el contacte amb el rail.



IL·LUSTRACIÓ 51. ESQUEMA DEL RAIL D'ALIMENTACIÓ⁶³

Per tal de que la tecnologia APS pugui ser implementada s'han de considerar algunes diferències que existeixen entre tramvies, turismes i camions. Per exemple, l'àrea de rail coberta per un turisme és menor que la d'un tram. Això fa que la seguretat del segment no cobert s'hagi de tenir en consideració.



IL·LUSTRACIÓ 52. DIFERÈNCIES ENTRE TRAMVIES I TURISMES⁶⁴

Per tal de garantir la seguretat únicament es proporciona energia als vehicles que tinguin una velocitat d'entre 60-100 km/h.

Altres diferències es poden veure a les següents taules (Viktorija Swedish ICT; KTH; Volvo GTT; Scania CV; Lund University; The Swedish Transport Administration; Bombardier; Vattenfall 2013):

⁶³ Font: (Viktorija Swedish ICT; KTH; Volvo GTT; Scania CV; Lund University; The Swedish Transport Administration; Bombardier; Vattenfall 2013)

⁶⁴ Font: (Viktorija Swedish ICT; KTH; Volvo GTT; Scania CV; Lund University; The Swedish Transport Administration; Bombardier; Vattenfall 2013)

Tramvia	Carretera
Col·lector fixe al centre del tram gracies a les guies del tram	El col·lector requereix mecanisme de posicionament lateral automàtic.
Exigeix una sola polaritat ja que la corrent retorna pels rails de les rodes	Exigeix dues polaritats
Potència màxima: 1000 kW	Potència màxima: 120 kW

TAULA 13. DIFERÈNCIES ENTRE TRAMVIES I TURISMES⁶⁵

El sistema permet la càrrega del vehicle amb subestacions que proporcionen 750 V amb una eficiència del 97% amb un cost per km de 1 M €/km.

Eficiència	97%
Cost	1 M €/km
Potència	126 kW
Velocitat	100 km/h
Compatibilitat	Total
Maduresa	TRL 5

TAULA 14. FACTORS SLIDE-IN⁶⁶

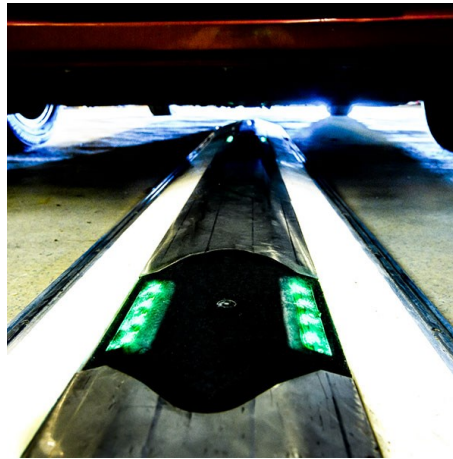
⁶⁵ Font: (Viktorja Swedish ICT; KTH; Volvo GTT; Scania CV; Lund University; The Swedish Transport Administration; Bombardier; Vattenfall 2013)

⁶⁶ Font: (Bateman et al. 2018)

2.1.4.3.1.4 Elonroad

Elonroad és una altre tecnologia ERS conductiva que proporciona càrrega per a tot tipus de vehicles elèctrics de manera dinàmica i estàtica. Té utilitat en la càrrega d'autobusos elèctrics, en pàrquings, mineria i també en HDV (Elonroad 2021).

La càrrega es produeix mitjançant un rail col·locat a l'asfalt. Com en el cas de Slide-in, al estar col·locat a la superfície, existeixen consideracions de seguretat que s'han de tenir en compte, i es per això que únicament s'activa el tram sobre el que el vehicle es troba situat. Té unes dimensions de 4 cm d'alçada i 35 cm d'amplada. Existeix una versió dissenyada per a autopistes que es troba submergida a l'asfalt a una profunditat de 5 cm i 25 cm d'amplada.



IL·LUSTRACIÓ 53. RAIL D'ALIMENTACIÓ⁶⁷

Com en l'anterior cas de conducció analitzat, és necessari l'ús d'un "pick-up" col·lector que fa contacte amb el rail i permet la transferència d'energia. En aquest cas, el col·lector també es troba sota el vehicle i en el cas dels cotxes té una alçada de 2 cm i 5-6 cm per als HDV i autobusos. Mitjançant tres col·lectors que llisquen per sobre del rail permet el contacte amb les dues polaritats en tot moment.

⁶⁷ Font: (Elonroad 2021)



IL·LUSTRACIÓ 54. BRAÇ COL·LECTOR⁶⁸

Aquest sistema d'ERS es proclama com a mètode efectiu per reduir la capacitat necessària de les bateries entre un 20-70% i augmentar l'autonomia dels vehicles. Permet ambdues afirmacions mitjançant una potència de fins a 300 kW. Els rails són alimentats mitjançant subestacions connectades a la xarxa cada 1 km, que transformen 10 kV a 600 V DC i proporcionen 3 MW al rail, potència suficient per a alimentar a tres HDV simultàniament. L'eficiència del sistema es del 90% amb un cost de 1.5 M €/km.

Una demostració de la tecnologia està tenint lloc actualment del 2020-2022 a Lund, ciutat sueca, on una carretera d'1 km carrega un autobús elèctric.



IL·LUSTRACIÓ 55. ESQUEMA DE LA DEMOSTRACIÓ⁶⁹

Eficiència	90%
Cost	1.5 M €/km
Potència	300 kW
Velocitat	90 km/h
Compatibilitat	Total
Maduresa	TRL 5

TAULA 15. FACTORS ELONROAD⁷⁰

⁶⁸ Font: (Elonroad 2021)

⁶⁹ Font: (Elonroad 2021)

⁷⁰ Font: (Bateman et al. 2018)

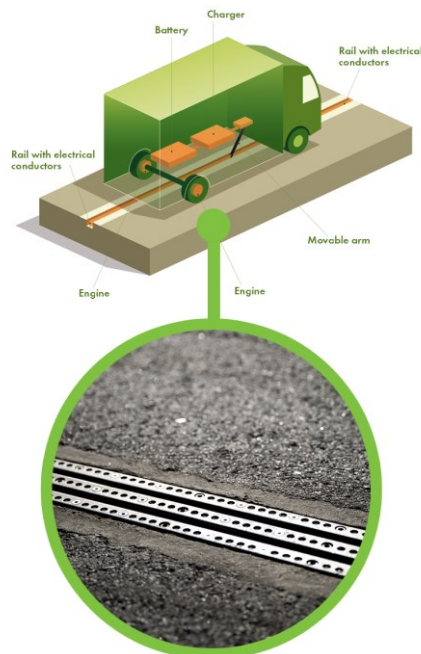
2.1.4.3.1.5 Elways

Elways és l'empresa creadora de la tecnologia utilitzada avui en dia a la carretera de demostració de 2 km eRoadArlanda que uneix la terminal de càrrega de l'aeroport d'Arlanda a Estocolm amb una zona logística (eRoadArlanda 2020).



IL·LUSTRACIÓ 56. DEMOSTRACIÓ EROADARLANDA⁷¹

La tecnologia d'Elways permet la transferència d'energia a partir d'un rail col·locat a la superfície de la carretera. Mitjançant un braç mòbil el vehicle es capaç de connectar-se al sistema i rebre l'energia.



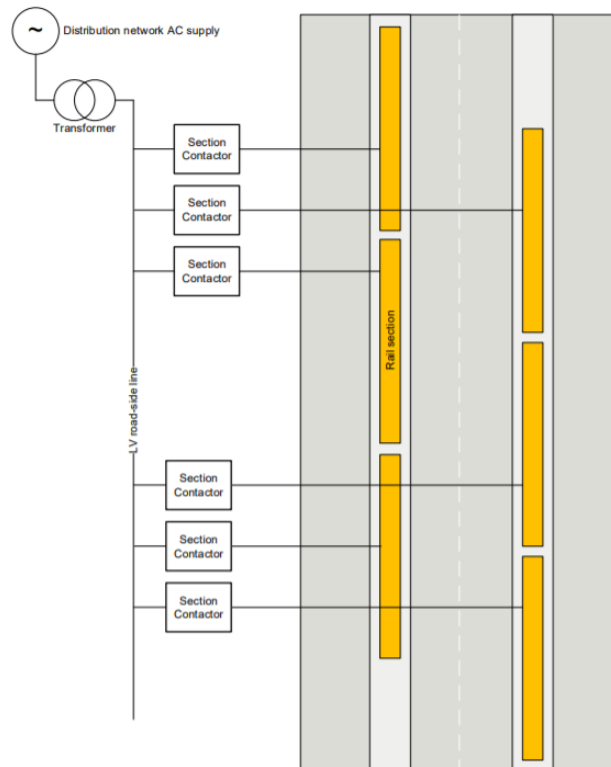
IL·LUSTRACIÓ 57. ESQUEMA DE LA TECNOLOGIA⁷²

⁷¹ Font: (ERoadArlanda 2020)

⁷² Font: (eRoadArlanda 2020)

El rail, per la seva banda es troba connectat a la xarxa i també funciona de manera automàtica. El braç mòbil detecta el rail a la carretera i s'hi connecta, en cas d'avançament el braç mòbil també es retira automàticament.

Com hem vist en casos anteriors, per assegurar la seguretat del sistema, el rail, dividit en trams, s'activa automàticament únicament quan un vehicle es troba a sobre seu. Quan un vehicle marxa o s'atura en un tram aquell tram es desconnecta. El sistema està estructurat com es pot veure a la següent imatge:



IL·LUSTRACIÓ 58. COMPONENTS DEL SISTEMA⁷³

També incorpora la capacitat de calcular el consum de cada vehicle connectat, de manera que els costos de l'electricitat puguin ser repartits per a cada vehicle que utilitza el sistema. Es tracta d'un sistema que, tot i estar pensat originalment per a proporcionar una potència de 200 kW a HDV circulant a 100 km/h, pot també carregar altres tipus de vehicles amb una eficiència del 95%. El cost del km d'aquesta solució és de 1 M €/km.

La tecnologia de Elways es pensa que té com a mínim un nivell TRL 6 donat que el sistema ha estat demostrat des de 2018 per eRoadArlanda. Tot i així, el col·lector encara no es troba en un estat en que es pugui utilitzar a llarg termini (Gustavson y Lindgren 2020).

⁷³ Font: (Hellgren y Honeth 2019)

Eficiència	95%
Cost	1 M €/km
Potència	200 kW
Velocitat	100 km/h
Compatibilitat	Total
Maduresa	TRL 6

TAULA 16. FACTORS ELWAYS⁷⁴

2.1.4.3.2 Inducció

Els mètodes ERS per inducció són aquells que no exigeixen el contacte directe entre el vehicle i el sistema per tal de transferir energia al vehicle ja que utilitzen el fenomen de la inducció. En aquest apartat comentarem els sistemes per inducció més reconeguts en l'actualitat i que es consideren de més importància.

Nom	Empresa/Universitat	Connexió i Vehicle	Estat	País
Electreon	Electreon	Inferior per a tots els vehicles	Demostracions a Tel Aviv, Gotland, Karlsruhe, Llombardia	Israel, Suècia, Alemanya i Itàlia
OLEV	Dongwon	Inferior per a tots els vehicles	Demostracions Corea del Sud	Corea del Sud
Primove	Bombardier	Inferior per a tots els vehicles	Demostracions a Alemanya i Suècia	Alemanya, Suècia

TAULA 17. RESUM ALTERNATIVES PER INDUCCIÓ⁷⁵

2.1.4.3.2.1 Electreon

Electreon és una empresa Israelí que ha desenvolupat un ERS inductiu per tal de carregar tot tipus de vehicles elèctrics. Com tots els ERS, el seu sistema compta amb un element col·lector de l'energia i un altre que la proporciona. A diferència dels casos estudiats amb anterioritat, no existeix contacte físic entre ambdós ja que l'energia es transmet per inducció («Technology | Electreon» 2020).

Per tal de transmetre l'energia Electreon proposa una infraestructura formada per tres elements:

- ✓ **Under-road units:** Aquestes unitats són la infraestructura que permet proporcionar l'energia al vehicle i estan totalment integrades a la carretera, evitant rails, relleus o línies de conducció. Aquestes unitats són diferents mòduls de bobines de coure.

⁷⁴ Font: (Bateman et al. 2018)

⁷⁵ Font: (Connolly 2017)



IL·LUSTRACIÓ 59. BOBINES EMISSORES⁷⁶

- ✓ **Management unit:** Aquesta unitat és la que abasteix les under-road units d'energia mitjançant la seva connexió a la xarxa i controla les interaccions amb els vehicles.
- ✓ **Vehicle-unit:** Per tal de poder rebre l'energia emesa per les under-road units és necessària l'adaptació dels vehicles a carregar ja que els fabricants de cotxe no els incorporen. A diferència de les tecnologies per conducció l'adaptació del vehicle és menys complicada i el receptor o col·lector es pot instal·lar fàcilment a la part inferior del vehicle:



IL·LUSTRACIÓ 60. BOBINA RECEPTORA⁷⁷

Es tracta de tecnologia menys madura que la conducció i que únicament gaudeix d'un nivell TRL 4 (Gustavson y Lindgren 2020). L'eficiència total del sistema s'espera que sigui del 90% per a una potència de 20 kW, abastint a un vehicle a 60 km/h. El cost per km del sistema és de 1 M €/km

⁷⁶ Font: (Electreon 2020)

⁷⁷ Font: (Electreon 2020)

Eficiència	90%
Cost	1 M €/km
Potència	20 kW
Velocitat	60 km/h
Compatibilitat	Total
Maduresa	TRL 4

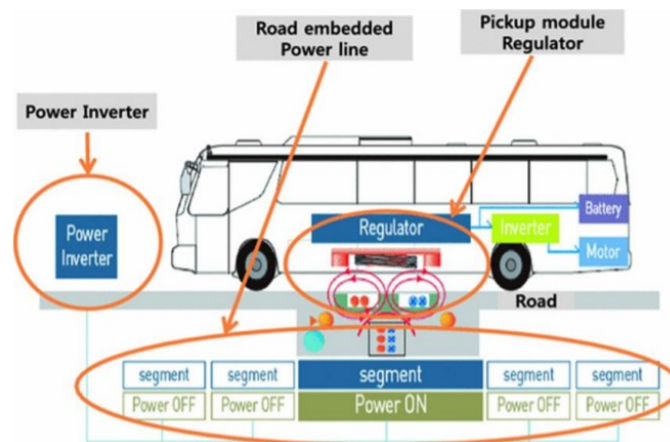
TAULA 18. FACTORS ELECTREON⁷⁸

2.1.4.3.2.2 OLEV

Durant els últims 10 anys, l'Institut de Ciència i Tecnologies Avançades de Corea ha desenvolupat sis generacions 1G-6G d'un sistema dinàmic de càrrega per a vehicles elèctrics. La implementació comercial d'aquests sistemes la du a terme el grup industrial Dongwon(Bateman et al. 2018).

Actualment existeixen diverses xarxes d'autobús a Corea del Sud que utilitzen diferents versions/generacions de la tecnologia d'inducció magnètica desenvolupada.

Com a l'anterior mètode la transferència d'energia es basa en la inducció magnètica que provoca un emissor a un receptor situat al vehicle a carregar. A la següent figura podem veure un esquema del funcionament del mètode en qüestió:



IL·LUSTRACIÓ 61. ESQUEMA DEL SISTEMA⁷⁹

En aquesta fotografia podem apreciar, com en moltes de les alternatives considerades, que només s'activa el segment a sobre del qual es troba el vehicle. Per tant aquesta solució, com les altres, també està composta per trams o unitats de càrrega que s'activen en detectar el vehicle.

OLEV té una eficiència total del 71% per a una potència de 22 kW abastint a un vehicle que pot circular fins a 60 km/h. El cost per km del sistema és de 0.5 M €/km. La tecnologia OLEV es creu que està en un estat TRL 7 donada la seva

⁷⁸ Font: (Bateman et al. 2018)

⁷⁹ Font: (Bateman et al. 2018)

demostració en aplicacions d'autobusos urbans. Per llargades i velocitats elevades de demostració es considera estar en estat TRL 4.

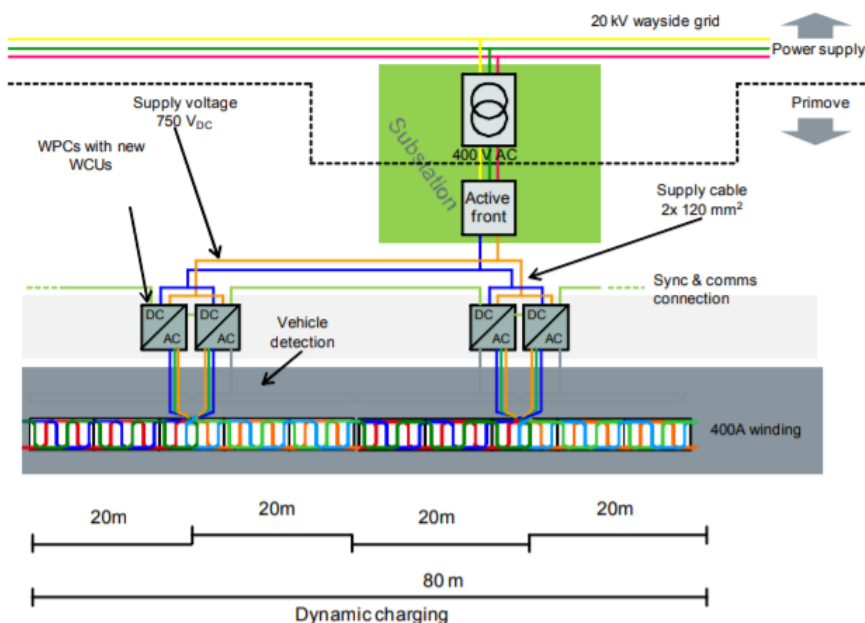
Eficiència	71%
Cost	0.5 M €/km
Potència	22 kW
Velocitat	60 km/h
Compatibilitat	Total
Maduresa	TRL 7

TAULA 19. FACTORS DE OLEV⁸⁰

2.1.4.3.2.3 Primove

Primove és una tecnologia desenvolupada per Bombardier primerament durant 2008-2009. Es tracta d'un sistema que funciona per Inducció sota els mateixos principis de ressonància ja esmentats.

Com altres, va començar sent una solució estàtica que es va desenvolupar per a les seves aplicacions dinàmiques. Té usos comercials en algunes xarxes d'autobús d'Europa. Les primeres versions permetien la mobilitat de la bobina receptora per tal de que aquesta es pogués aproximar a la bobina emissora en punts específics de carregar. Versions posteriors van aplicar canvis tecnològics que han augmentat la capacitat de transmissió eliminant així la necessitat del moviment de la bobina col·lectora (Bateman et al. 2018).



IL·LUSTRACIÓ 62. ESQUEMA DEL SISTEMA⁸¹

⁸⁰ Font: (Bateman et al. 2018)

⁸¹ Font: (Viktorija Swedish ICT; KTH; Volvo GTT; Scania CV; Lund University; The Swedish Transport Administration; Bombardier; Vattenfall 2013)

El sistema té una eficiència del 90% entregant una potència de fins a 200 kW a un vehicle que pot circular fins als 50 km/h. El cost per km d'aquesta tecnologia és de 6.15 M €/km i es considera que la seva maduresa tecnològica es situa en el nivell TRL 5

Eficiència	90%
Cost	6.15 M €/km
Potència	200 kW
Velocitat	50 km/h
Compatibilitat	Total
Maduresa	TRL 5

TAULA 20. FACTORS PRIMOVE⁸²

⁸² Font: (Bateman et al. 2018)

2.1.4.4 Resum d'alternatives

	eHighway	Honda	Slide-in	Elonroad	Elways	Electreon	OLEV	Primove
Eficiència	85%	95%	97%	90%	95%	90%	71%	90%
Cost	2.2M €/km	0.13 M €/km	1 M €/km	1.5 M €/km	1 M €/km	1 M €/km	0.5 M €/km	6.15 M €/km
Potència	500 kW	450 kW	126 kW	300 kW	200 kW	20 kW	22 kW	200 kW
Velocitat	80 km/h	150 km/h	100 km/h	90 km/h	100 km/h	60 km/h	60 km/h	50 km/h
Compatibilitat	Parcial	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total
Maduresa de la Tecnologia	TRL 6	TRL 4	TRL 5	TRL 5	TRL 6	TRL 4	TRL 7	TRL 5

TAULA 21. RESUM DE TOTES LES ALTERNATIVES⁸³

⁸³ Font: Pròpia

3 Metodologia de selecció d'alternatives

La metodologia escollida per a la selecció d'alternatives serà una combinació entre dos mètodes de decisió multi criteri (MCDM) que seran el Procés Analític Jeràrquic (AHP) i el mètode VIKOR. Un cop definits els factors de decisió, s'utilitzarà el mètode AHP per al càlcul dels seus pesos i posteriorment el mètode VIKOR per a la selecció de una o varies solucions de compromís (Muñoz Medina y Romana García 2016).

3.1.1 Elements del procés de decisió

Per tal de poder el mètode de selecció escollit, primer hem de revisar quins elements del procés ens permetran dur-la a terme.

3.1.1.1 Criteris i Pesos

Per una banda, i donat que s'ha d'avaluar un seguit d'alternatives, és necessari definir uns factors de decisió que siguin significatius, és a dir que aportin informació important sobre cada solució i que ens ajudin a ponderar quina de les alternatives és la més adient en funció dels pesos que s'assignin a cada factor.

La relativa prematuritat del camp i les poques dades sobre operacions reals en les demostracions o proves que s'han fet fins ara només permeten l'avaluació dels resultats a partir de factors més generals. Val a dir que, els factors avaluats són únicament pertanyents a la tecnologia en si, però que per tal d'una implementació total dels sistemes ERS existeixen altres aspectes com un pla de negoci o l'acceptació social del projecte que s'haurien de tenir en compte. No obstant, com dèiem, aquesta informació és difícil d'avaluar en la situació actual del camp. Els factors en consideració són per tant els següents:

- ✓ **Eficiència:** L'eficiència del sistema ens dona una mida percentual de l'energia que el sistema és capaç d'utilitzar efectivament. Per tant, els sistemes amb una eficiència major seran més ben valorats ja que requereixen menys energia per fer una mateixa feina que un sistema amb eficiència menor.
- ✓ **Cost:** El cost ens indica l'import que seria necessari per tal de posar en funcionament la infraestructura requerida en cadascuna de les solucions ERS. És un factor de pes, ja que la majoria de les solucions ERS necessiten una inversió inicial considerable. Les solucions amb cost més baix seran més ben valorades.
- ✓ **Potència:** La potència del sistema és un factor decisiu ja que d'ella depèn el temps de recàrrega del vehicle. Els sistemes amb major potència permeten una recàrrega del vehicle més ràpida i per tant redueixen la

llargada del sistema ERS i pot ser el seu cost per tant seran valorats positivament.

- ✓ **Velocitat:** La velocitat a la que el vehicle pot fer ús del sistema ERS és important ja que limita quins vehicles o carreteres podrien fer ús del sistema en qüestió. Es considerarà un benefici aquells sistemes amb un rang de velocitats major.
- ✓ **Maduresa de la Tecnologia:** La maduresa de la tecnologia és el factor que ens indica en quin punt es troba aquesta. El desenvolupament de les solucions pot ser lent i és per tant important discernir entre quines alternatives podrien ser implementades actualment i quines no. Per tal d'avaluar aquest factor s'utilitzarà els Technology Readiness Levels (TRL), que van ser inventats per la NASA els anys 70 i que s'utilitzen habitualment a l'hora de descriure sistemes ERS en la literatura. Els nivells TRL a considerar són els següents (Gustavson y Lindgren 2020):
 - **TRL 1:** Principis bàsics observats i registrats.
 - **TRL 2:** Concepte tecnològic o aplicació formulat/da.
 - **TRL 3:** Funció característica analítica i experimental i/o prova de concepte.
 - **TRL 4:** Validació del component en un entorn de laboratori.
 - **TRL 5:** Validació del component en un entorn rellevant.
 - **TRL 6:** Demostració del sistema o prototip en un entorn rellevant.
 - **TRL 7:** Demostració del sistema en un entorn operacional.
 - **TRL 8:** Sistema final completat i qualificat mitjançant proves i demostracions.
 - **TRL 9:** Sistema final provat mitjançant operativa satisfactòria.
- ✓ **Compatibilitat:** La compatibilitat és el factor que emmarcarà la capacitat del sistema de carregar vehicles elèctrics de diferents tipus. Es considerarà beneficiós una compatibilitat alta. Donat que és un element subjectiu, les valoracions d'aquest criteri seran Total=1 i Parcial=0.5.

D'altra banda, un cop definits els factors o criteris que ens permetran discriminar cadascuna de les alternatives hem de especificar els pesos que se'ls hi atorgaran. És a dir, és necessari definir la seva ponderació en funció de la importància que els mateixos tenen en el procés de decisió. Aquests pesos assignats als criteris vindran recollits en un vector associat de pesos, sent n el nombre de criteris:

$$[w] = [w_1, \dots, w_n]$$

Cada pes w_i reflexa la importància d'un criteri C_i i s'assumeix que és positiu. És del més habitual que els criteris de decisió no tinguin un pes igual en la decisió, per tant per tal d'assignar aquests pesos existeixen dues corrents principals:

- ✓ **Mètode d'assignació directa:** En aquesta modalitat la persona que ha de prendre una decisió, assigna de manera directa els pesos a cada criteri

- ✓ **Mètode de l'autovector:** En aquest mètode els pesos corresponen a les components de l'autovector associat a l'autovalor dominant de la matriu de comparació aparellada dels criteris. Això es farà en aquest estudi mitjançant l'aplicació del mètode AHP, el fonament matemàtic del qual queda fora de l'abast d'aquest estudi.

3.1.1.2 Alternatives i Matriu de Valoració

Seguidament, és necessari definir les alternatives. Les alternatives són les diferents maneres que hi ha de donar solució a la decisió en estudi. Per als problemes multi criteri, les alternatives es defineixen com un conjunt finit de solucions a un problema. Aquestes han de ser analitzades durant l'estudi del problema de manera clara i ressaltant els fets diferencials amb les altres opcions. El conjunt d'alternatives es designa amb l'expressió:

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}, \text{ on } A_i (i = 1, 2, \dots, m)$$

Una vegada definit el conjunt de les alternatives, els criteris i els seus pesos, aquell qui ha de fer la decisió ha de proporcionar, en funció de tots els criteris seleccionats i per a cada alternativa en concret, una valoració designada per un valor numèric al que anomenarem a_i que expressa una relació entre alternativa i criteri. Aquestes valoracions es recullen en el que es coneix com a matriu de valoració, on cada fila emmagatzema les valoracions d'una alternativa en concret i cada columna fa el mateix pels criteris.

		Criteris de decisió i pesos associats					
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C _n
		w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	w ₅	w _n
Alternatives	A ₁	a ₁₁	a ₁₂	...	a _{1j}	...	a _{1n}
	A ₂	a ₂₁	a ₂₂	...	a _{2j}	...	a _{2n}
	a _{3j}	...	a _{3n}
	A _i	a _{i1}	a _{i2}	...	a _{ij}	...	a _{in}

	A _m	a _{m1}	a _{m2}	...	a _{mj}	...	a _{nm}

TAULA 22. Matriu de Valoració⁸⁴

3.1.2 Definició dels mètodes de decisió

Primerament, començarem explicant el mètode AHP. El mètode AHP només s'utilitzarà per a calcular la importància relativa, és a dir el pes, de cada criteri de decisió. Per tal de fer-ho, el mètode AHP necessita que s'estableixi la matriu de comparació aparellada de cada criteri utilitzant la escala de T.L. Saaty en la que el número 1 indica que la parella de criteris té una mateixa importància, el 3 una

⁸⁴ Font: (Muñoz Medina y Romana García 2016)

importància moderada, el 5 una importància forta, el 7 una importància molt forta i el 9 una importància extrema enfront un altre. L'efectivitat d'aquesta escala està empíricament provada en aplicacions a situacions de decisió reals.

Igual	Moderat	Fort	Molt fort	Extrem
1	3	5	7	9

TAULA 23. ESCALA DE SAATY⁸⁵

Mitjançant aquesta escala es pot escriure la matriu esmentada de comparació aparellada que sempre complirà la forma següent:

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C _n
C ₁	1	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a _{1n}
C ₂	1/a ₁₂	1	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a _{2n}
C ₃	1/a ₁₃	1/a ₂₃	1	a ₃₄	a ₃₅	a _{3n}
C ₄	1/a ₁₄	1/a ₂₄	1/a ₃₄	1	a ₄₅	a _{4n}
C ₅	1/a ₁₅	1/a ₂₅	1/a ₃₅	1/a ₄₅	1	a _{5n}
C _n	1/a _{1n}	1/a _{2n}	1/a _{3n}	1/a _{4n}	1/a _{5n}	1

TAULA 24. MATRIU DE COMPARACIÓ APARELLADA⁸⁶

On la diagonal al comparar sempre un criteri amb si mateix serà igual a 1. El vector propi de la matriu un cop normalitzada ens donarà els pesos de cada criteri. A més a més el mètode AHP ens permet comprovar si els judicis sobre la importància establerta a la matriu de comparació és consistent o no mitjançant la Proporció de consistència, la qual mai ha de superar el 10%. Aquesta es calcula com el quocient entre l'índex de consistència⁸⁷:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

I l'Índex Aleatori, IA, de la matriu, que dona un índex de consistència d'una matriu aleatòria:

Rang	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índex Aleatori	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

TAULA 25. ÍNDEXS DE CONSISTÈNCIA ALEATÒRIA⁸⁸

Seguidament, s'utilitzarà el mètode VIKOR que és un mètode que es pot classificar com a mètode de superació. Els mètodes de superació són aquells que utilitzen les relacions de superació entre les diferents per tal de proporcionar un rànquing de les alternatives millor classificades. Es tracta d'un mètode adequat a utilitzar quan existeixen criteris no commensurables, de diferents unitats, o de caire

⁸⁵ Font: (Muñoz Medina y Romana García 2016)

⁸⁶ Font: (Muñoz Medina y Romana García 2016)

⁸⁷ λ_{max} Es calcularà als annexes.

⁸⁸ Font: (Muñoz Medina y Romana García 2016)

qualitatiu. Ens proporciona la solució que està a una distància més curta de la solució ideal. El procés a seguir és el següent:

- ✓ Es calculen els millors f_i^* i els pitjors f_i^- valors per a cada criteri:

$$f_i^* = \max_i f_{ij} \quad f_i^- = \min_i f_{ij} \quad \text{Si la funció } i \text{ és un benefici}$$

$$f_j^* = \min_j f_{ij} \quad f_j^- = \min_j f_{ij} \quad \text{Si la funció } i \text{ és un cost}$$

- ✓ Es calculen els valors S_j , R_j i Q_j per a cada alternativa:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-}$$

$$R_j = \max_i \left[w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right]$$

$$Q_j = v \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*}$$

On $S^* = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^* = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$ i $v = 0.5$.

- ✓ S'endrecen les alternatives en funció dels valors S , R i Q en ordre obtenint tres llistes.
- ✓ Es determinarà com a solució aquella alternativa $A^{(1)}$ que sigui la millor classificada en el valor Q , és a dir la que tingui un Q mínim, sempre i quan es compleixin les següents condicions d'estabilitat:

- **Condició d'avantatge acceptable:**

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ$$

On $A^{(2)}$ és la segona alternativa més ben classificada i $DQ = 1/j - 1$, sent j el nombre d'alternatives a considerar.

- **Condició d'estabilitat acceptable en el procés de decisió:**

Aquesta condició estableix que l'alternativa $A^{(1)}$ també ha de ser la millor classificada segons els valors de S i/o R .

Si una de les dues condicions no es compleix, aleshores es proposa un conjunt de solucions de compromís consistent en:

- ✓ Alternatives $A^{(1)}$ i $A^{(2)}$ si no es satisfà la segona condició
- ✓ Alternatives $A^{(1)}$, $A^{(2)}$, ..., $A^{(M)}$; on $A^{(M)}$ es determina mitjançant la relació:

$$Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$$

4 Resultats

En aquest apartat s'expliquen els resultats obtinguts mitjançant l'aplicació de la metodologia descrita a l'anterior apartat, basada en l'aplicació seqüencial dels mètodes AHP i VIKOR.

L'aplicació del mètode AHP ens permet l'obtenció del vector de pesos w de manera objectiva a partir de la comparació de criteris mitjançant la matriu aparellada, la qual és elaborada a partir de les importàncies relatives establertes per l'escala de Saaty. La matriu aparellada dels criteris d'aquest estudi es presenta a continuació:

Matriu Aparellada	Eficiència	Cost	Potència	Velocitat	Compatibilitat	Maduresa de la Tecnologia
Eficiència	1	1/3	1/3	5	3	1
Cost	3	1	3	5	7	3
Potència	3	1/3	1	5	7	1/3
Velocitat	1/5	1/5	1/5	1	1	1/5
Compatibilitat	1/3	1/7	1/7	1	1	1/5
Maduresa de la Tecnologia	1	1/3	3	5	5	1

TAULA 26. MATRIU APARELLADA DE CRITERIS⁸⁹

La consistència dels judicis suposats respecte les comparacions entre criteris exposades per aquesta matriu no està exempta d'error, per tant és necessària la comprovació de la Proporció de consistència que en el nostre cas és del 8,62% confirmant que les comparacions suposades són prou coherents i permetent un càlcul objectiu del vector pes.

$$PC = \frac{CI}{IA} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \cdot \frac{1}{IA}$$

$$PC = \frac{0.1070}{1.24} = 0.0862$$

Havent calculat el vector pes, hem de determinar els valors f_i^* i f_i^- per a cada criteri considerat per tal de tenir totes les dades necessàries per aplicar el mètode VIKOR. El conjunt necessari de dades es presenta a la taula següent:

⁸⁹ Font: Pròpia

	Pes Relatiu	fi*	fi-
Eficiència	0,1311	97	71
Cost	0,3787	0,13	6,15
Potència	0,1914	500	20
Velocitat	0,0402	150	50
Compatibilitat	0,0379	1	0,5
Maduresa de la Tecnologia	0,2208	7	4

TAULA 27. PESOS RELATIUS, Fi* i Fi-⁹⁰

Podem veure que els pesos obtinguts mitjançant el mètode AHP mostren una importància majoritàriament enfocada al cost, seguit de maduresa de la tecnologia, potència, eficiència, velocitat i compatibilitat. Seguidament, es presenten els valors de Q, S i R obtinguts mitjançant l'aplicació del mètode VIKOR.

	Qj	Sj	Rj
eHighway	0,1050	0,3303	0,1302
Honda	0,1952	0,2508	0,2208
Slide-in	0,1849	0,3711	0,1491
Elonroad	0,1826	0,3725	0,1472
Elways	0,0290	0,2781	0,1196
Electreon	0,2469	0,3666	0,1837
OLEV	0,2755	0,3811	0,1906
Primove	1,0000	0,7210	0,3787

TAULA 28. VALORS DE Q, S i R⁹¹

⁹⁰ Font: Pròpia

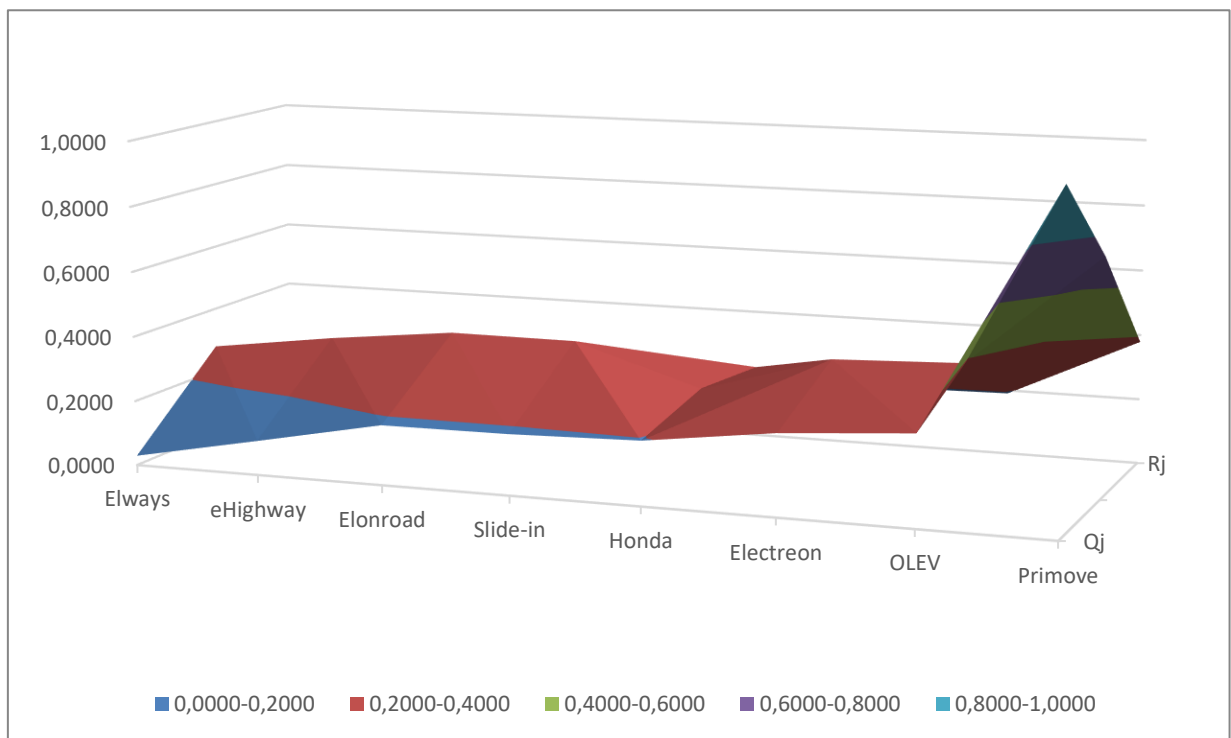
⁹¹ Font: Pròpia

I finalment el rànquing de les alternatives endreçades a partir de la columna Q.

	Qj	Sj	Rj
Elways	0,0290	0,2781	0,1196
eHighway	0,1050	0,3303	0,1302
Elonroad	0,1826	0,3725	0,1472
Slide-in	0,1849	0,3711	0,1491
Honda	0,1952	0,2508	0,2208
Electreon	0,2469	0,3666	0,1837
OLEV	0,2755	0,3811	0,1906
Primove	1,0000	0,7210	0,3787

TAULA 29. RÀNQUING D'ALTERNATIVES PER Q, S, I R⁹²

A la següent gràfica podem veure la representació gràfica en forma de superfície dels resultats obtinguts:



IL·LUSTRACIÓ 63. RÀNQUING GRÀFIC DE LES ALTERNATIVES⁹³

⁹² Font: Pròpia

⁹³ Font: Pròpia

Examinant la representació gràfica i el rànquing d'alternatives podem veure que l'alternativa amb un millor valor de Q es Elways. Seguidament trobem eHighway, Elonroad, Slide-in, Honda, Electreon, OLEV i finalment Primove.

Generalment es pot observar que, d'entre totes les alternatives, les tecnologies inductives han fet el pitjor paper. Aquestes han estat condemnades, en funció de cada cas, per el seu cost, baix nivell de maduresa tecnològica, o bé per potències significativament menors que les que són capaces de presentar les opcions per conducció. En el cas de Primove, per exemple, l'alternativa pitjor valorada amb un valor de Q igual a 1, la causa d'una puntuació tant deficient és el seu elevat cost, factor amb més pes, de 6,15 M €/km que és el més elevat d'entre totes les solucions. Seguidament, veiem que trobem les opcions d'OLEV i Electreon. Aquestes solucions per inducció, tot i presentar valoracions semblants a la resta d'alternatives en els factors amb més importància, tenen nivells de potència, que és el tercer valor amb més pes, un ordre de magnitud menor respecte al conjunt de candidats. Això les col·loca com les dues següents pitjors alternatives dins del rànquing.

Analitzant ara el sector de les solucions per conducció, veiem que les podem dividir en dos subgrups. Per una banda tenim les alternatives Honda, Slide-in i Elonroad amb valors de Q pràcticament idèntics de 0,18-0,19 i d'altra banda, tenim un altre grup on hi ha les dues alternatives que s'erigeixen com a millors candidates que serien eHighway i Elways amb valors de Q de 0,1050 i 0,0290 respectivament.

Del primer subgrup veiem que l'opció proposada per Honda és la que té una pitjor puntuació. Es tracta d'una alternativa que supera a Elonroad o Slide-in en quant a cost i potència però que no és suficient per contrarestar els efectes d'una puntuació menor en l'aspecte de la maduresa de la tecnologia. D'altra banda, la competència entre Slide-in i Elonroad es decanta a favor d'aquesta última donat que, tot i tenir un cost major i una maduresa de la tecnologia igual, té una potència que és més del doble que la de Slide-in i valoracions d'eficiència, velocitat i compatibilitat semblants o iguals.

Del segon subgrup veiem que de les dues millor candidates, eHighway i Elways, aquesta última destaca amb el valor de Q més baix. Això és així donat que, tot i que eHighway té una potència que és més del doble que la de Elways, té puntuacions pitjors o iguals en tota la resta de factors essent la diferència en el cost la més significativa.

D'entrada doncs, Elways sembla ser la millor alternativa d'entre totes les analitzades. Tot i així, no podem afirmar que aquesta sigui la millor i proposar una solució única ja que al no complir-se la condició d'avantatge acceptable⁹⁴,

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ$$

$$DQ = \frac{1}{j-1}; \text{ on } j \text{ és el nombre d'alternatives}$$

ens veiem obligats a presentar un conjunt solució $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)}$; on el valor m és igual al nombre d'alternatives que formen el conjunt solució. Per determinar m fem ús de la desigualtat⁹⁵:

$$Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$$

A partir d'aquesta, veiem que l'últim valor de m que permet el compliment de la desigualtat és $m=2$ i per tant el conjunt queda com a $A^{(1)}$ i $A^{(2)}$.

Així doncs, el conjunt de solucions proposades estarà format de les solucions **Elways** i **eHighway**. La gràfica ens confirma que, ambdues alternatives tenen valors de Q baixos situats en l'interval 0-0,1, mentre que la resta d'alternatives per conducció es troben en l'interval de 0,1-0,2 presentant bones condicions. En últim lloc queden les alternatives per inducció que denoten ser una tecnologia menys madura que la conducció. Si hi pensem, veiem que el mètode ens proposa dues solucions que ens permeten, per una banda, cobrir la necessitat de càrrega dels HDV que pot ser aplicada per al transport de mercaderies a llarga distància i, per una altra banda, fer el mateix per al conjunt de LDV que podria usar-se en entorns més urbans donant així una solució general.

⁹⁴ Calculat a l'annex

⁹⁵ Calculat a l'annex

5 Pressupost

En aquest apartat presentarem un resum del pressupost, que al ser un estudi, consta d'uns costos relativament petits.

Equipament	Cost
Amortització de l'ordinador utilitzat.	9,30€
Hores dedicades	Cost
300h	3600€
Consum elèctric	Cost
0.14 €/kWh	8,4€
Pressupost Total de l'estudi	
3617,7€	

TAULA 30. RESUM DEL PRESSUPOST TOTAL DE L'ESTUDI⁹⁶

L'amortització de l'equipament utilitzat s'ha calculat considerant una amortització lineal amb un preu inicial de 1100 € i una vida útil de 4 anys. El preu de les hores dedicades s'ha considerat de 12€/h. I finalment, el consum elèctric s'ha calculat considerant una potència consumida per l'equipament de 200 W.

⁹⁶ Font: Pròpia

6 Conclusions

La realització d'aquest estudi ha permès efectuar un anàlisi sobre sistemes de càrrega de vehicles elèctrics en moviment (ERS) que poden ser emprats o implementats mitjançant les solucions tecnològiques actuals.

Aquest anàlisi, ha permès l'aplicació d'un mètode de selecció d'alternatives per tal de proposar, en funció d'uns criteris definits, quina de les alternatives proposades és la més adient. La importància relativa de cada criteri, és a dir els pesos, calculats mitjançant el mètode AHP ha deixat com a dada rellevant que el Cost és el factor amb una ponderació més elevada. Això té sentit donat que la majoria de sistemes ERS requereixen inversions inicials elevades. Per tant, podem veure que l'establiment dels pesos mitjançant AHP ens permet obtenir uns valors de manera sistemàtica i objectiva. Els criteris escollits pretenen aconseguir discernir quina de les tecnologies té millors capacitats en tots ells. Val a dir però, que aquestes capacitats no tenen en compte l'especificitat de l'aplicació per a la que cada disseny va ser desenvolupat. És a dir que el que s'ha buscat és quina seria la millor solució general per a tots els EVs.

L'aplicació de mètodes de decisió multi criteri en la selecció d'alternatives d'aquest estudi mitjançant l'execució seqüencial dels mètodes AHP i VIKOR, ens ha permès organitzar la informació i contemplar totes les possibles alternatives i criteris o factors que determinen quina és la solució adequada.

El mètode VIKOR, per la seva part, ens ha permès la proposició d'un conjunt d'alternatives de compromís que es poden considerar adequades per a l'estudi en qüestió.

Examinant els resultats veiem que les alternatives denominades de conducció han obtingut uns resultats molt més òptims que les alternatives que es basen en la inducció. Això és degut principalment a que al ser una tecnologia menys madura presenta costos elevats i baixes potències i velocitats.

Les solucions obtingudes, Elways i eHighway, són de les més desenvolupades i demostrades, cosa que fa que els resultats obtinguts tinguin sentit. eHighway per la seva part només permet la càrrega de HDV, mentre que Elways permet la càrrega de tot tipus de vehicles. Finalment, podem dir que qualsevol de les dues solucions seria adequada per a la càrrega de vehicles elèctrics en moviment.

6.1 Futurs Desenvolupaments

Examinant les conclusions podem veure que existeixen certs desenvolupaments que aquest o altres estudis podrien desenvolupar en un futur. Per una banda, des de la perspectiva dels criteris de decisió, s'haurien de centrar esforços en reunir més dades significatives de demostracions i d'operativa real de les diferents alternatives per tal de poder introduir altres criteris en el procés de selecció d'alternatives, com podrien ser costos de manteniment, impacte ambiental, costos d'operació, percentatge de reducció de la mida de les bateries dels EVs aconseguit amb cada mètode i altres criteris que es podrien considerar en la mesura de que més informació estigués disponible respecte a aquestes tecnologies.

D'una altra banda, com s'ha comentat a les conclusions, aquest estudi es focalitzava a trobar quina de les alternatives proposades era una millor candidata per a ser implementada de manera general per als EVs. L'estudi de les alternatives considerades fa notar però que és possible que alternatives molt vàlides per a HDV no siguin la millor opció en quan a la càrrega de vehicles lleugers en moviment. Per tant, un altre futur desenvolupament d'aquest estudi podria ser l'estudi per separat d'alternatives que siguin adequades només per a vehicles lleugers LDV o bé només per a HDV obtenint així solucions específiques per a cada sector del transport. Una altra manera d'enfocar aquesta cerca de solucions específiques podria ser en funció de l'entorn, com ara solucions per a entorns urbans, autopistes i altres. Es podria estendre l'estudi a altres vehicles elèctrics utilitzats en entorns urbans per al desplaçament, com ara les motocicletes elèctriques per tal de que fossin també compatibles amb sistemes ERS.

Finalment, per tal de donar més amplitud a aquest estudi, enfocat en gran mesura a la vessant tecnològica, s'haurien de considerar altres aspectes de vital importància per a la implementació real dels sistemes ERS com podrien ser el seu model de negoci, un anàlisi de quins són els actors necessaris per la seva posada en marxa i operativa, com podria ser la xarxa elèctrica, la companyia propietària de la tecnologia, la administració responsable de la carretera i altres. Com a idea per a un futur llunyà, es pot destacar el potencial que podrien arribar a tenir els sistemes ERS, combinats amb tecnologies de pilotatge automàtic, per tal d'automatitzar el sector del transport a llargues distàncies.

Molts d'aquests desenvolupaments són difícils de planificar degut a que no se sap quan es produiran més demostracions de les solucions en qüestió ni quan les dades de la seva operativa, impacte i altres estaran disponibles.



Agraïments

Per començar, agrair al tutor d'aquest estudi, Daniel Arumí, l'ajuda prestada durant la seva realització i la seva implicació i interès de manera no presencial degut a la situació actual.

D'altre banda agrair a familiars i amics els ànims i missatges de suport que m'han fet arribar durant el procés.

7 Bibliografia

ABB, 2020. DC Fast Charger | ABB. [en línea]. [Consulta: 25 noviembre 2020]. Disponible en: <https://new.abb.com/ev-charging/products/car-charging/dc-fast-chargers>.

Alternative Fuels Data Center: Developing Infrastructure to Charge Plug-In Electric Vehicles. [en línea], 2020. [Consulta: 17 noviembre 2020]. Disponible en: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure.html.

Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work? [en línea], 2020. [Consulta: 12 noviembre 2020]. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>.

Alternative Fuels Data Center: How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen? [en línea], 2020. [Consulta: 12 noviembre 2020]. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>.

Alternative Fuels Data Center: How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Work? [en línea], 2020. [Consulta: 13 noviembre 2020]. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work>.

Alternative Fuels Data Center: Hybrid Electric Vehicles. [en línea], 2020. [Consulta: 11 noviembre 2020]. Disponible en: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_basics_hev.html.

ANGELOV, G., ANDREEV, M. y HINOV, N., 2018. Modelling of Electric Vehicle Charging Station for DC Fast Charging. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, vol. 2018-May, pp. 1-5. ISSN 21612536. DOI 10.1109/ISSE.2018.8443663.

ARMAND, M., AXMANN, P., BRESSER, D., COPLEY, M., EDSTRÖM, K., EKBERG, C., GUYOMARD, D., LESTRIEZ, B., NOVÁK, P., PETRANIKOVA, M., PORCHER, W., TRABESINGER, S., WOHLFAHRT-MEHRENS, M. y ZHANG, H., 2020. Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments. *Journal of Power Sources*, vol. 479, no. September. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2020.228708.

AUTOBILD, 2020. ¿Cuánto tiempo se tarda en cargar un coche eléctrico como el BMW i3? -- Coche eléctrico -- Autobild.es. [en línea]. [Consulta: 20 noviembre 2020]. Disponible en: https://www.autobild.es/noticias/cuanto-tiempo-tarda-cargarse-coche-electrico-como-bmw-i3-188014#modal_67.

BAIK, Y., HENSLEY, R., HERTZE, P. y KNUPFER, S., 2019. Making electric vehicles profitable McKinsey Center for Future Mobility ® Making electric vehicles profitable. *McKinsey & Company* [en línea], no. March. Disponible en: [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive and Assembly/Our Insights/Making electric vehicles profitable/Making-electric-vehicles-profitable.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Making%20electric%20vehicles%20profitable/Making-electric-vehicles-profitable.pdf).

BATEMAN, D., LEAL, D., REEVES, S., EMRE, M., STARK, L., MYERS, R. y

- LAMB, M., 2018. TRL ACADEMY REPORT PPR875 Electric Road Systems: a solution for the future. ,
- CEU, 1999. Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). *Official Journal of the European Communities*, pp. 59-70.
- CONNOLLY, D., 2017. Economic viability of electric roads compared to oil and batteries for all forms of road transport. *Energy Strategy Reviews* [en línea], vol. 18, pp. 235-249. ISSN 2211467X. DOI 10.1016/j.esr.2017.09.005. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.09.005>.
- CUI, L.F., YANG, Y., HSU, C.M. y YI, C., 2009. Carbon-silicon Core-shell nanowires as high capacity electrode for lithium Ion batteries. *Nano Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 3370-3374. ISSN 15306984. DOI 10.1021/nl901670t.
- ELECTREK, 2020. Tesla battery researcher unveils new cell that could last 1 million miles in «robot taxis» - Electrek. [en línea]. [Consulta: 15 noviembre 2020]. Disponible en: <https://electrek.co/2019/09/07/tesla-battery-cell-last-1-million-miles-robot-taxis/>.
- ELECTREON, 2020. ElectReon - Dynamic wireless charging - YouTube. [en línea]. [Consulta: 28 noviembre 2020]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=04enYJUDpul&feature=emb_logo.
- ELONROAD, 2021. Elonroad – Charge on the fly. [en línea]. [Consulta: 20 diciembre 2020]. Disponible en: <https://elonroad.com/>.
- EROADARLANDA, 2020. eRoadArlanda. [en línea]. [Consulta: 5 diciembre 2020]. Disponible en: <https://eroadarlanda.com/>.
- EROADARLANDA, 2020. The technology - eRoadArlanda. [en línea]. [Consulta: 24 diciembre 2020]. Disponible en: <https://eroadarlanda.com/the-technology/>.
- GUSTAVSON, M.G.H. y LINDGREN, M., 2020. Maturity of power transfer technologies for electric road systems. ,
- GUSTAVSSON, M.G.H., HACKER, F. y HELMS, H., 2019. Overview of ERS concepts and complementary technologies. [en línea], no. April. Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1301679/FULLTEXT01.pdf>.
- HAIDER, M., RUSSER, J.A. y MFIPT, W.E.R.T., 2017. Field Modeling of Dynamic Inductive Power Supply. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 2017)* [en línea], vol. 10, pp. 1490-1493. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1109/ICEAA.2017.8065564>.
- HELLGREN, M. y HONETH, N., 2019. Efficiency of AC conductive eRoad charging system – Analysis of experimental data. *3rd Electric Road Systems Conference 2019 Frankfurt am Main, Germany*, no. May, pp. 1-6.
- How Does a Lithium-ion Battery Work? | Department of Energy. [en línea], 2020. [Consulta: 17 octubre 2021]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/articles/how-does-lithium-ion-battery-work>.



- ICNIRP, 2010. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz TO 100 kHz). *Health Physics*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836. ISSN 00179078. DOI 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- IEEE, 2006. *IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*. S.l.: s.n. ISBN VO -.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020, 2020. Global EV Outlook 2020. *Global EV Outlook 2020*, DOI 10.1787/d394399e-en.
- KURZWEIL, P., 2010. Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery-The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 14, pp. 4424-4434. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2009.12.126.
- KUSHNIR, D., 2015. Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015 Current State and Future Prospects. . S.l.:
- LI, R., CHEN, Z., BRESSER, D., ASENBAUER, J., EISENMANN, T., KUENZEL, M. y KAZAZI, A., 2020. Sustainable Energy & Fuels Interdisciplinary research for the development of sustainable energy technologies The success story of graphite as a lithium-ion anode material-fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites The success story of graphite as a lithium-ion anode material-fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites. , vol. 4, pp. 5363-5870. ISSN 2398-4902. DOI 10.1039/d0se00175a.
- MARCOS, A., 2015. Design and control of a battery charger for electric vehicles. . S.l.:
- MUÑOZ MEDINA, B. y ROMANA GARCÍA, M., 2016. Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento Matemático*, vol. 6, no. 2, pp. 27-45. ISSN 2174-0410.
- PANCHAL, C., STEGEN, S. y LU, J., 2018. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [en línea], vol. 21, no. 5, pp. 922-937. ISSN 22150986. DOI 10.1016/j.jestch.2018.06.015. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- PETERS, J.F., BAUMANN, M., ZIMMERMANN, B., BRAUN, J. y WEIL, M., 2017. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 67, pp. 491-506. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2016.08.039. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>.
- SIEMENS, 2017. eHighway-2017. ,
- SIVAK, M. y SCHOETTLE, B., 2018. Relative Costs of Driving Electric and Gasoline Vehicles in the Individual U.S. States. *Sustainable worldwide*



- transportation*, no. January, pp. 1-31.
- SUN, Y., KONG, L., ABBAS KHAN, H. y PECHT, M.G., 2019. Li-ion Battery Reliability - A Case Study of the Apple iPhone®. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 71131-71141. ISSN 21693536. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2918401.
- TAJIMA, T., 2019. Study o f 450 -kW Conductive ERS at 150km/h. ,
- TAJIMA, T., 2020. 450-kW Conductive Electric Road System by Honda. , no. May, pp. 1-5.
- Technology | Electreon. [en línea], 2020. [Consulta: 27 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.electreon.com/technology>.
- Tesla's Battery Supply Problem - YouTube. [en línea], 2020. [Consulta: 18 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=1Xwxw0wU4b8&t=5s>.
- TESLA, 2020. Onboard Charger | Tesla. [en línea]. [Consulta: 19 noviembre 2020]. Disponible en: https://www.tesla.com/es_ES/node/46962?redirect=no.
- TÖPLER, J., 2016. *Hydrogen and Fuel*. S.l.: s.n. ISBN 9783662449714.
- VIKTORIA SWEDISH ICT; KTH; VOLVO GTT; SCANIA CV; LUND UNIVERSITY; THE SWEDISH TRANSPORT ADMINISTRATION; BOMBARDIER; VATTENFALL, 2013. Slide-in Electric Road System. *Swedish Viktoria* [en línea], no. October, pp. 1-65. Disponible en: https://www.viktoria.se/sites/default/files/pub/www.viktoria.se/upload/publications/slide-in_inductive_project_report_draft_phase_1_2013-10-18.pdf.
- VOLKSWAGEN, 2020. «We are open to e-collaboration» | Volkswagen Newsroom. [en línea]. [Consulta: 16 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/stories/we-are-open-to-e-collaboration-4620>.
- VOLVO, 2019. Electromobility made easy. ,
- WALLBOX, 2020. ¿Cuánto tiempo tarda en cargarse un coche eléctrico? | Wallbox. [en línea]. [Consulta: 21 noviembre 2020]. Disponible en: https://wallbox.com/es_es/faqs-cuanto-tiempo-tarda-cargarse-vehiculo-electrico.
- WARNER, J., 2015a. Basic Terminology. *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, pp. 23-33. DOI 10.1016/b978-0-12-801456-1.00003-8.
- WARNER, J., 2015b. Lithium-Ion and Other Cell Chemistries. *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, no. Cid, pp. 65-89. DOI 10.1016/b978-0-12-801456-1.00007-5.
- WIKIPEDIA, 2020. NEMA connector - Wikipedia. [en línea]. [Consulta: 26 noviembre 2020]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/NEMA_connector#NEMA_5.
- YILMAZ, M. y KREIN, P.T., 2013. Review of battery charger topologies, charging



power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169. ISSN 08858993. DOI 10.1109/TPEL.2012.2212917.