

## Master Amaierako Lana

Konputazio Ingeniaritza eta Sistema Adimentsuak Unibertsitate  
Masterra

---

# Trenen trakzio profilen optimizazioa energia kontsumoa minimizatuz

---

*Josu Loidi Astiazaran*

### **Zuzendaria**

Josu Ceberio Uribe

### **Tutorea**

Jon Goya Mendiluce

2022ko uztailaren 13a



# Laburpena

Proiektu hau CAF-Signalling enpresak dituen beharrei erantzun bat emateko burutu da. Gaur egun energia kontsumoaren minimizazioa enpresa guztiek mahai gainean jarri behar duten gai bat da, eta bide horretan, tren industriari dagokionez, nabarmendu behar den alorretako bat da. Horregatik, lan honen helburua gaur egungo trenen energia kontsumoa murrizteko ekarpen bat egitea da, eta horretarako, gidatze estrategian zentratuko da lan hau, trena martxan dagoenean ahalik eta gutxien kontsumitzeko.

Horregatik, lan honetan optimizazio problema bat diseinatu da, eta energia minimizatzeko helburua duten estrategiak lortzeko oinarriak jarri dira. Aipatu behar da ia hutsetik burutu den lan bat dela eta hortaz, helbururik garrantzitsuena proiektua bideragarria den ala ez ikustea izan dela, zehatza eta aplikagarria den lan bat egitea baino. Bide horretan, bi optimizazio hurbilketa planteatu dira: batetik, momentuoro zuzenean trenaren azelerazioa zein izango den definituz gidatzea kontrolatzea; eta bestetik, kontsigna abiadura batzuk optimizatzea, ondoren ibilbide osoa sortzeko erabiliko direnak. Dena den, helburu funtzioa erabilitako energia kontsumoa minimizatzea izango da bi kasuetan.

Energia kontsumoari dagokionez, enpresak proiektu desberdinetan burututako probetan eskuratutako datuak erabili dira konparazioak egiteko, izan ere, kontsumo datu errealek eskaintzen dituzte gaur egungo tren batzuek. Hala ere, proposatu diren trakzio estrategien kontsumoa balioztatzea teorikoa izan da, eta enpresak emandako ekuazio desberdinak aplikatuz egin dira kalkuluak. Gainera, kontsumo teorikoa eta errealaren arteko azterketa bat egin da ekuazioen balidaziorako, eta ondorioztatu da proposatutako ekuazioak erabiltzea bideragarria dela.

Bestetik, problemaren formalizazioari eta hau garatzeko planteatu diren bi hurbilketei eman zaie garrantzirik handiena, eta ez optimizazio algoritmoaren aukeraketari. Izan ere, gure ustetan, lortu diren emaitzen arrakasta ez dago inplementatu den algoritmoaren baitan, proposatutako hurbilketaren eta honen bideragarritasunaren baitan baizik.

Emaitzei dagokienez, proposatutako bi hurbilketetako lehenarekin ezin izan da soluzio bideragarririk lortu, baina bigarren hurbilketak gaur egungo CAF-Signallingen erabiltzen diren trakzio profilak hobetu ditu, bai energia kontsumoaren kudeaketan eta baita ibilbide desberdinen ezaugarrietara egokitzean.

Amaitzeko, aipatu proiektu hau CAF-Signalling empresan burutu dela eta txosten hau egindako lan guztia deskribatzeko erabiliko dela. Hasieran, proiektua definituko da. Ondoren, lagungarriak izango diren kontzeptuen nahiz aurrekarien errepaso zabal bat egingo da, eta horretaz baliatuz problemaren formalizazioa burutuko da, bi ikuspegi desberdinetatik. 4. kapituluaren aukeratu den algoritmoa azaldu eta inplementazioa deskribatuko da, eta hurrengo kapituluaren esperimentazioaren deskribapen zabal bat emango da. Dokumentua

ii

ixteko, lortu diren emaitzak erakutsiko dira eta ondorio eta etorkizuneko lanak proposatuko ditugu.

# Gaien aurkibidea

<b>Gaien aurkibidea</b>	<b>iii</b>
<b>Irudien aurkibidea</b>	<b>v</b>
<b>Taulen aurkibidea</b>	<b>vii</b>
<b>1 Sarrera</b>	<b>1</b>
<b>2 Testuingurua eta aurrekariak</b>	<b>3</b>
2.1 Testuinguru industrial	3
2.1.1 Automatic Train Control (ATC)	3
2.1.2 Automatic Train Operation (ATO)	4
2.2 Artearen egoera	6
2.2.1 Optimizazio problema eta energia-kontsumoaren modelizazioa	6
2.2.2 Optimizazio metodoak	10
2.3 Proposamena	11
<b>3 Problemaren formalizazioa</b>	<b>13</b>
3.1 Parametro orokorrak	13
3.2 Elementuen deskribapena	14
3.3 Kontsumo energetikoaren kalkulua	16
3.4 Azelerazioen hurbilketa	19
3.4.1 Gainontzeko profilen kalkulua	20
3.4.2 Optimizazio problema	22
3.5 Kontsigna abiaduren hurbilketa	23
3.5.1 Balaztarik gabeko abiaduraren erregulazioa	23
3.5.2 Simulatzaileren implementazioa	24
3.5.3 Optimizazio problema	26
<b>4 Algoritmoa</b>	<b>29</b>
4.1 Sarrera	29
4.2 Algoritmoaren diseinu orokorra	30
4.2.1 Azelerazioen hurbilketa	33
4.2.2 Kontsigna abiaduren hurbilketa	34
<b>5 Esperimentazioaren prestaketa</b>	<b>35</b>
5.1 Instantziak	35
5.2 Parametroen doiketa	38

5.2.1	Prestaketa . . . . .	38
5.2.2	Emaitzak . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Esperimentazioaren emaitzak</b>	<b>41</b>
6.1	Azelerazioen hurbilketa . . . . .	41
6.2	Kontsigna abiaduren hurbilketa . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Ondorioak eta etorkizunerako lanak</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Optimizazio problemaren formalizazioa</b>	<b>51</b>
<b>B</b>	<b>Instantzien deskribapena</b>	<b>53</b>
<b>C</b>	<b>Emaitzen laburpena</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>67</b>

# Irudien aurkibidea

2.1	ATC egituraren ilustrazioa metro-sistemetan. . . . .	5
2.2	Trenaren operazioa (kontrola) ATOarekin. . . . .	5
2.3	Bi geltokien arteko abiadura profila eta trenak egindakoa. . . . .	6
2.4	Denbora-energia grafikoa, Pareto kurba eta aukeratutako profilak [Domínguez et al., 2010] . . . . .	11
3.1	Adibideko sekzioko lau profilak, distantzia-profila X ardatzean kokatuta. . . . .	16
3.2	Kontsumo originala eta kalkulatuaren arteko korrelazio grafikoa. . . . .	19
3.3	Balaztarik gabeko abiaduraren erregulazioa aplikatzen duen adibide bat. . . . .	24
3.4	Inplementazio hau jarraitzen duen adibideko profil baten emaitza. . . . .	26
4.1	<i>Differential Evolution</i> algoritmoaren oinarriko eragiketen ilustrazioa. . . . .	31
5.1	<i>Heatmap</i> grafikoa, parametro doiketako emaitzak bistaratzeko. . . . .	39
6.1	8. instantziaren abiadura eta azelerazio profilak, 2 exekuzio. . . . .	42
6.2	9. instantziaren abiadura eta azelerazio profilak, 2 exekuzio. . . . .	43
6.3	9. instantziaren abiadura eta azelerazio profilak. . . . .	44
6.4	5. instantziarekin lortutako profila (ezkerra) eta profil "originala"(eskuina) . . . . .	45
6.5	1. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	46
6.6	9. instantzian lortutako profil guztien denbora-kontsumo grafikoa. . . . .	46
6.7	6 eta 12. instantziekin lortutako konbergentzia kurbak . . . . .	47
C.1	1. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	59
C.2	2. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	60
C.3	3. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	60
C.4	4. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	61
C.5	5. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	61
C.6	6. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	62
C.7	7. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	62
C.8	8. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	63
C.9	9. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	63
C.10	10. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	64
C.11	11. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	64
C.12	12. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa . . . . .	65





# Taulen aurkibidea

2.1	Bigarren hurbilketako parametroak . . . . .	8
3.1	Ibilbide bati dagozkion parametro orokorrak . . . . .	13
3.2	Trenari dagozkion parametro orokorrak . . . . .	14
3.3	Profilen kalkulurako parametro orokorrak . . . . .	15
3.4	Kontsumo energetikoaren kalkulurako beharrezko parametroak . . . . .	17
3.5	Puntu bakoitzeko potentziak kalkulatzeko ekuazioak . . . . .	17
3.7	Lehen hurbilketako parametro espezifikoak . . . . .	19
3.8	Bigarren hurbilketako parametroak . . . . .	24
4.1	Differential Evolution algoritmorako beharrezko parametroak . . . . .	30
5.1	Erabiliko den trenari dagozkion parametroen balioak . . . . .	36
5.2	1. instantziako (Takanini - Te Mohia) parametroak . . . . .	37
5.3	8. instantziako (Lugaritz - Errekalde BRT20) parametroak . . . . .	37
5.4	11. instantziako (Zumaia - Deba BRT10) parametroak . . . . .	37
6.1	Azelerazioen hurbilketa erabiliz lortutako emaitzak . . . . .	42
6.2	Kontsigna abiaduren hurbilketa erabiliz lortutako emaitza batzuk . . . . .	44
B.1	1. instantziako (Takanini - Te Mohia) parametroak . . . . .	53
B.2	2. instantziako (Te Mohia - Manurewa) parametroak . . . . .	54
B.3	3. instantziako (Homai - Puhinui) parametroak . . . . .	54
B.4	4. instantziako (Takanini - Newmarket) parametroak . . . . .	55
B.5	5. instantziako (Takanini - Papakura) parametroak . . . . .	55
B.6	6. instantziako (Homai - Te Mohia) parametroak . . . . .	55
B.7	7. instantziako (Lugaritz - Errekalde BRT) parametroak . . . . .	56
B.8	8. instantziako (Lugaritz - Errekalde BRT20) parametroak . . . . .	56
B.9	9. instantziako (Zarautz - Zumaia BRT10) parametroak . . . . .	56
B.10	10. instantziako (Zumaia - Deba BRT) parametroak . . . . .	57
B.11	11. instantziako (Zumaia - Deba BRT10) parametroak . . . . .	57
B.12	12. instantziako (Donostia - Deba BRT10) parametroak . . . . .	57



## Sarrera

Gaurkotasuneko gai garrantzitsu bat da energia kontsumoa eta kutsadura, eta horregatik, lan handia egiten da arlo guztietan ahalik eta energia gutxien kontsumitzeko. Gainera, urteetan aurrera egin ahala, kontsumo handia duten tresna edo zerbitzuak baztertzeko bidean goaz, eta hor tartean aurkitu dezakegu trenen industria. Gaur egungo tren ia guztiak elektrikoak izan arren, energia kontsumoa existitzen da eta esanguratsua da.

Testuinguruan jartzeko, [García-Álvarez et al., 2012] artikuluan hainbat garraiobideren kontsumoak biltzen dira, eta hauek aztertu daitezke. Hasteko, energia gutxien kontsumitzen duen garraiobidea trena da,  $0.8 - 1 kWh/t-km$  artean, hainbat ikerketen arabera. Horrela, konparatzen hasi ezker, kerosenoa erabiltzen duten nazioarteko hegazkinek  $18.3 kWh/t-km$ ko kontsumoa dute, kamioiek  $4.5 kWh/t-km$ koa eta nazioarteko itsasontziek  $1.1 - 1.5 kWh/t-km$  artekoa.

Bide honetan, Europako trenbide-ikerketak agentziak kaleratu duenaren arabera <sup>1</sup>, *Climate Neutral Europe for 2050* programarako hainbat hobekuntza eta garapen proposatzen dira energia kontsumoari dagokionez. Tartean aurkitu daitezke energia kontsumoa murriztea, Europako trenbide-sistema osorako erregai fosilak ordezkatzeko alternatibak sustatzea eta trena garraiobide ekologikoena dela frogatzea.

Horregatik, lan hau tren batek behar duen energia kontsumoa murrizteko proposamen bat egiteko asmoarekin burutu da. Energia kontsumo hori murrizteko aukera asko egon daitezke: zirkuitu elektriko galerak hobetzea, trenean energia galerak kontrolatzea, motor eta inbertsoreen energia kontsumoa hobetzea edo trenen arteko antolaketa hobetzea energia aurrezteko. Kasu honetan, trenaren operazio-kontrolen arabera minimizatu nahi da energia kontsumoa, hau da, trenaren gidatze estrategia optimizatu nahi da. Horretarako, hainbat ezaugarri hartuko ditugu kontuan, tartean, ibilbidearen orografia (aldapak eta kurbak, gutxiago trakzionatzeko).

Testuinguru honetan automatizazioa ere aipatu behar da, izan ere gaur egun tren askoren gidatzea automatikoa da eta gehienetan trena martxan jarri aurretik erabakitzen da nola gidatuko den ibilbide osoan zehar. Jokaera hori automatikoki kalkulatu den arren, normalean ez da kontuan hartzen energia kontsumoa, eta gehiago zentratzen da helmugara

<sup>1</sup><https://www.horizon-europe.gouv.fr/sustainable-and-green-rail-system-29822>

ordurako iristen. Energia kontsumoa minimizatzea eta horretarako tresneria eta algoritmia guztia garatzea izango da lan honen xedea.

Esan bezala, aurretik burutu diren lanen azterketa sakon bat egin da, eta ondoren problemaren formalizazioa diseinatu da. Horretarako, enpresako moldeetara moldatu da, batez ere aipatuko diren profilen formatuan eta energiaren estimazioan, oinarri batzuk eginda baitaude. Ondoren, soluzio optimoa lortzeko bidean *Differential Evolution* izeneko optimizazio teknika aplikatu da, eta eginda dauden benetako probetako emaitzekin konparatu dira lortutakoak, soluzio hobea lortzen den ala ez aztertzeko. Amaitzeko, proiektu hau CAF-Signalling enpresan buruko denez, aplikazio industrial bat izateko helburuz egin da, hau da, ondoren benetako tren baten inplementatzeko asmoarekin. Horregatik, etorkizunean aztertu egin beharko da inplementazioa tren batera eramatea (enbarkatzea) bideragarria den ala ez.

Hala ere, azpimarratu beharra dago proiektu honen helburua oinarriak finkatzea dela, eta beraz, zehaztasun asko alde batera utzi dira eta benetan problema ebatzigarria den ala ez ikustea izan da xedea. Horregatik, dokumentu honetan atal batzuk deskribatu dira ondoren egindako proiektuan aplikatu ez direnak. Dena dela, atal horiek etorkizunerako lan moduan utzi dira, proiektuarekin aurrera egitea erabakitzen bada kontuan hartzeko.

# Testuingurua eta aurrekariak

Kapitulu honetan burutu den proiektuaren testuingurua landuko da. Horretarako, lehenik eta behin, tren industriaren deskribapena eta gaur egungo automatizazio teknika orokorra zein den azalduko da, izan ere, proiektua gauzatzeko *Automatic Train Operation*aren (ATO) oinarrizko kontzeptu batzuk hartu beharko dira kontuan. Ondoren, artearen egoerari dagokionez, burutu diren antzeko lanen deskribapen zehatz bat egingo da, batez ere, energia kontsumoaren formalizazioan eta erabilitako optimizazio teknika desberdinetan zentratuz. Amaitzeko, proiektu honi dagokion proposamen zehatza egingo da, landutako lan eta artikuluetatik abiatuta.

## 2.1 Testuinguru industrialak

Tren industria arlo handi eta zabala da: trenak ekoiztu, mantendu eta eguneratu behar dira etengabe, eta zentzu horretan, gaur egun oso presente dagoen alorra automatizazioa da. Hala ere, trenen automatizazioa ez da gauza berria, eta ikuspuntu desberdinak ditu lekuaren arabera, nahiz eta estandarizatzeko bidean oso aurreratuta dagoen.

Horrela, atal honetan tren industriaren inguruko oinarrizko kontzeptu eta ideiak errepasatuko dira eta automatizaziorako emandako lehen pausuak zein izan ziren deskribatuko dira. Ondoren, oinarri hauekin, gaur egun horren erabilia den *Automatic Train Control* (ATC) sistemaren sarrera bat egingo da, benetan interesatzen zaigun kontzeptura iritsi arte, ATOrak.

### 2.1.1 Automatic Train Control (ATC)

Trenaren lehen garaietatik, tren baten kontrol segurua eskuz egiten da, lurreko seinale bisualen laguntzaz. Kasu horretan, kabina bateko makinista batek kontrolatzen du trenea, eta lurreko elementuetatik jasotzen du trenbidearen egoerari buruzko informazioa (bideko balizak, trenbideko zirkuituak eta abar) denbora errealean [Midya and Thottappillil, 2008], eta trenaren kontrol-komandoak etengabe hartzen ditu, trenen trafikoa kontrolatzeko zentro baten bidalketa-aginduei jarraituz. Hala ere, trenbide-sistemen garapenarekin, trenak kontrolatzeko estrategia horrek bi arazo nagusi izan ditu. Alde batetik, lurreko seinale bisualak erabiltzeak gidariak seinalea ez ikustea, gaizki irakurtzea edo, besterik

gabe, seinaleei kasurik ez egitea ekar dezake [Clark, 2012], arazo larriak eraginaz. Bestalde, gidatze manuala gidarien esperientzia eta irizpide profesionaletan oinarritzen da nagusiki, eta horrek, bereziki, ez du kalkulu zorrotzik eta optimizaziorik energiaren kontsumoari dagokionez. Adibidez, distantzia txikian pilotutako metro-linea batean, trenen eskuzko operazioek (kontrolak) ezin dute errendimendu ona lortu [Yin et al., 2017].

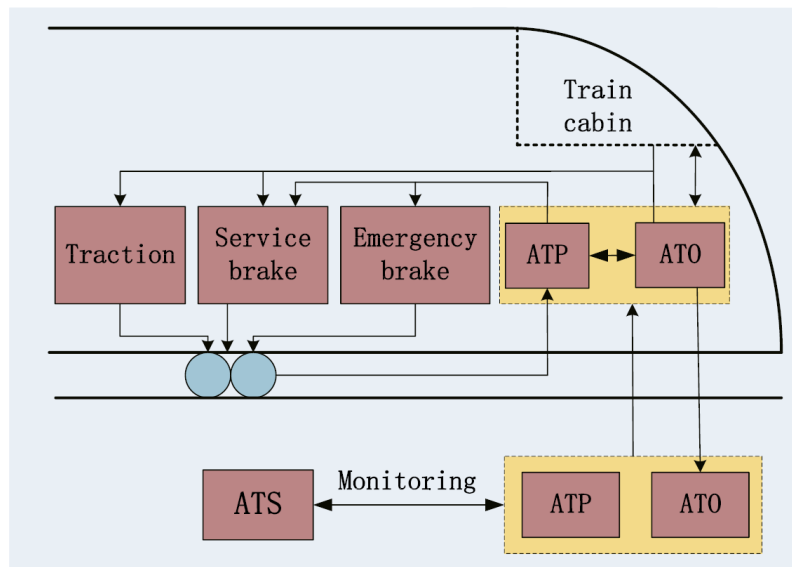
Horrela, urteak aurrera egin ahala, Erresuma Batuko *Great Western Railway* enpresak ekipamendu elektromekanikoa erabiliz ATC sistema garatu zuen, lurreko seinale bisual bat gerturatzen zen bakoitzean gidariari klaxon batekin abisatuko ziona. Horrela, hasieran "abisu sistema" bat zena, gaur egun treneko aspektu ia guztiak kontrolatzen dituen sistema bat izatera iritsi da ATCa. ATC sistema seinaleztapen-sistema integratu bihurtu da, eta trenbideetako trenen kontrola, ikuskapena eta kudeaketa konbinatzen ditu, gidariei (edo haien ordezkoei) trenen mugimenduak automatikoki kontrolatzen laguntzeko, trenbideetako trenen zirkulazio segurua eta eraginkorra bermatzeko [Greenway and Sheldon, 1974]. Bereziki, gaur egungo ATC sistemak hiru azpisistema ditu, 2.1 irudian ikusi daitekeen bezala: *Automatic Train Protection* (ATP), *Automatic Train Supervision* (ATS) eta *Automatic Train Operation* (ATO):

- ATS sistema trenen mugimendua gainbegiratzeaz arduratzen da, aurreikusitako ordutegira eta aurreikusitako trafiko-eredura egokitzen direla bermatzeko. Honako ataza hauek betetzen ditu: trenen egoera gainbegiratzea, ibilbideak automatikoki aukeratzea, ordutegiak automatikoki sortzea, egindako operazioak automatikoki erregistratzea, estatistikak eta txostenak sortzea eta sistemaren egoera automatikoki gainbegiratzea.
- ATP sistema hutsegite-probetarako sistema bat da, eta banakako trenen zirkulazio seguruaren arduraduna da. ATPak abiadura-mugak ezartzen dizkie mugitzen ari diren trenei, eta trenak abiadura-muga gainditzen duenean, ATPak automatikoki exekutatu du balaztatze-agindua (edo larrialdietarako balaztatze-agindua) trenaren geldiarazteko eta segurtasuna mantentzeko.
- ATO sistemak gidari baten ordezkoei kabina funtzioak betetzen ditu, tartean, trenaren azelerazio leuna kontrolatzea beharrezko abiaduraraino, abiadura erregulazioa eta helmugako nasan zehaztasunez gelditzea. Egoera normaletan, trakzio eta balazta kontrolerako komando guztien arduraduna da ATO, eta, beraz, funtsezkoa da trenen operazio-sistemen eraginkortasun operatiborako eta errentagarritasunerako [Dong et al., 2010].

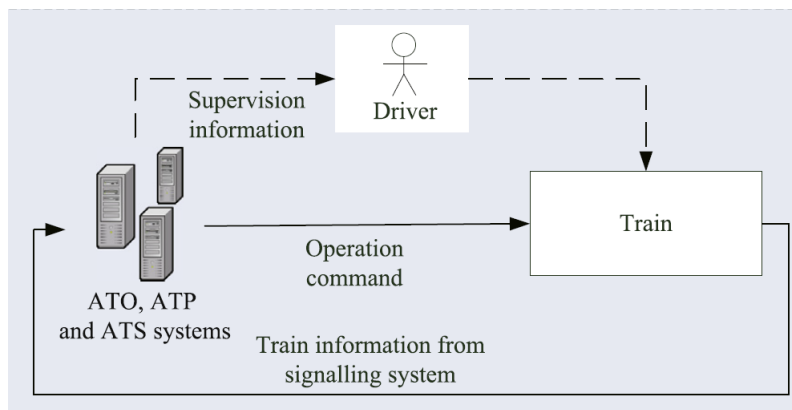
Hortaz, laburbilduz, ATPak trenen tarte segurua eta gehiegizko abiaduraren aurkako babesa bermatzen ditu, ATSak trenak aurrez zehaztutako ordutegian mantentzen ditu, eta ATOa trenen estrategia operatiboez arduratzen da, eta testuinguru honetan trenen efizientziarekin zuzenean lotuta dago.

### 2.1.2 Automatic Train Operation (ATO)

Hortaz, proiektua burutzeko azaldutako hiru sistemetatik ATO sistemarekin egingo dugulan, hau baita trenaren kontrolaz arduratzen den sistema, eta ondorioz, trenaren efizientzia kontrolatzeko aukera emango diguna. Programazio eta kontrol informatikoko teknikak erabiliz, ATOren oinarritzko ideia gidariei (edo hauen ordezkoei) trenaren mugimenduetan



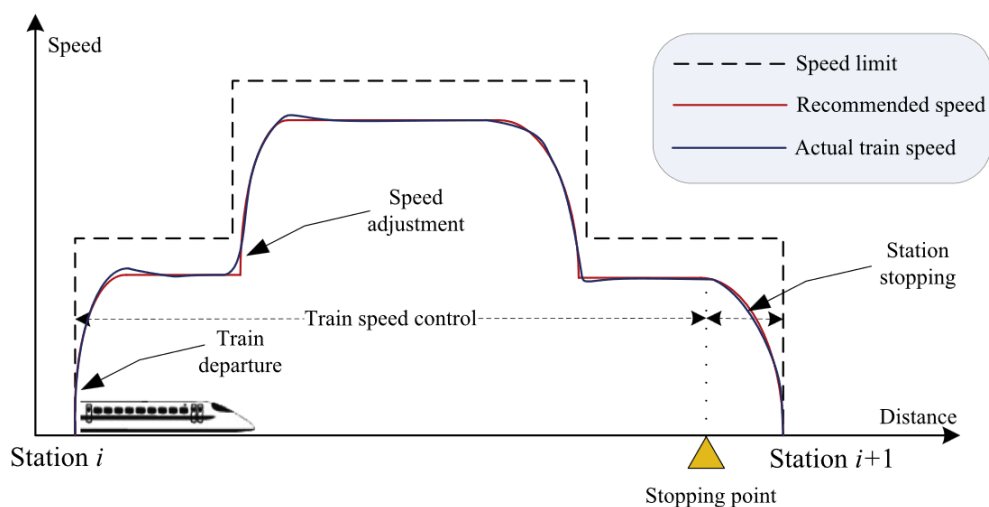
2.1 Irudia: ATC egituraren ilustrazioa metro-sistemetan.



2.2 Irudia: Trenaren operazioa (kontrola) ATOarekin.

automatikoki laguntzea da, beti ere ATP eta ATS sistemen gainbegiratzearekin (ikus 2.2 irudia). Horrela, ATOk funtzioen ezaugarriek aspektu hauek har ditzakete [Yin et al., 2017]:

- ATO sistemaren funtzio nagusia trena bi geltokiren artean automatikoki gidatzea da. Trenaren operazio-prozesuan, ATOak informazioa jasotzen du denbora errealean: abiadura-mugak, trenaren abiadura eta ATPren posizio-informazioa, baita bidaiariorabidea eta helburuko geltokiko informazioa ere. Normalean, trena irten aurretik 2.3 irudiaren moduko abiadura-profil gomendatu bat sortzen da, eta hala, trenaren abiadura ibilbideko puntu bakoitzean zein izango den definituko da, hurrengo geltokira garaiz iritsiz. Trena geltokitik atera ondoren, ATOaren abiadura kontrolatzaileak trenaren kontrol-komandoak doitu azelerazioa, *coasting* (inertzia bidezko nabigazioa), gurutzaldi-abiadura edo balaztatzea bete daitez.
- ATOren beste funtzio garrantzitsu bat trena geltokian automatikoki gelditzea da. Momentu honetan, ATOak gelditzeko distantziaren eta trenaren uneko abiadura-



2.3 Irudia: Bi geltokien arteko abiadura profila eta trenak egindakoa.

ren arabera balaztatze-indizeak modu dinamikoan doitzen ditu, trena zehaztasunez gelditzeko helburuarekin.

- Bidaiariak garraiatzeko ATO sistema treneko atek automatikoki ireki eta ixteaz arduratzen da trena geltoki bakoitzera iristen denean edo handik irteten denean.
- Gainera, ATOaren funtzio gehigarriek barne hartzen dituzte trenen atzera-martxa automatikoa, trenen identifikazio positiboa, etab.

## 2.2 Artearen egoera

Behin testuinguru industrial aipatu ondoren, landu diren hainbat lanetan antzeko problemei nola aurre egiten zaien zerrendatuko da, gure proiektua burutzeko lagungarri izango delakoan. Alde batetik, optimizazio problemaren zentratuko gara, problemaren formalizazioan zehatzagoak izateko. Bestetik, behin problemaren formalizazioa definitu denean, optimizaziorako erabili diren teknika eta metodoak aztertuko dira.

### 2.2.1 Optimizazio problema eta energia-kontsumoaren modelizazioa

Orokorrean, tren baten energia optimizatzeko ezaugarri desberdinak hartu behar dira kontuan, eta aztertu egin behar da zein den ezaugarri horietako bakoitzari ematen zaion garrantzia. Horietatik garrantzitsuenak honako hauek dira [Miyatake and Ko, 2010]:

1. Trakzioa: energia kontsumoa trakzioan kontsumitzen den potentzia elektriko moduan kalkulatzen da [Domínguez et al., 2011], beraz, trenaren trakzioa izango da kontuan hartu behar den elementu garrantzitsuenetako bat.
2. Zirkulazioarekiko erresistentzia: trena martxan dagoenean, eragina dauka marruskadurak eta airearekiko erresistentziak.



3. Ibilbide-profila: ibilbidearen orografia kontuan hartu daiteke, aldapak aprobetxatuz ahalik eta gutxien trakzionatzeko. Aldapa gorak balaztatzeke, eta aldapa beherak azeleratzeko.
4. Energia birsortzea: tren gehienek balaztatzean energia sortzeko gaitasuna dute, ondoren inguruko trenei bidali edo eurek erabili dezaketena.

Hortaz, ibilbidea burutzeko bideragarria den trakzio/abiadura profil edo estrategia bat aukeratzen du kontrol-sistemak [Fernandez et al., 2006]. Horrela, tren bat geltoki batean gelditu behar denean, erabiltzailearen ikuspuntutik nahiago izaten da trenaren zirkulazio denbora handiagoa izatea geltokian denbora gehiago geldirik ematea baino. Gainera, kontrol-estrategia honek energia aurrezteak dakar, izan ere, abiadura profil geldoagoek trakzio tarte gutxiago daukate eta ondorioz, energia kontsumo baxuagoa [Domínguez et al., 2011]. Orokorrean, ATOko abiadura profil hauek denboraren eta konfortaren arabera diseinatu dira, eta ez energia-kontsumoaren arabera.

Horregatik, tren baten energia kontsumoa estimatzeko gai den eredu fidagarri bat sortzeko, nahitaezkoa da erabakitzea ereduaren konplexutasuna zein izango den. Faktore eta parametro desberdinak kontuan hartu edo baztertu daitezke, ereduaren zehaztasunaren eta errealitatearekiko hurbiltasunaren eta emaitzen fidagarritasunaren arabera [Martínez Fernández et al., 2019].

Beraz, energiaren erabilera optimizatzen duten abiadura profilak lortzeko, hainbat teknika matematiko aplikatu dira. [Khmelnitsky, 2000, Howlett et al., 2009] lanetan abiadura profil optimoa maximoaren printzipioa aplikatuz kalkulatu da, eta kontsumo minimoa duen abiadura profil bat bilatzen da. Beste lan batzuetan faktore gehiago gehitzen dira, tartean, ustekabeko atzerapenak [Cucala et al., 2012], balazta birsortzaileak [Lu et al., 2016], trenaren masaren aldaketa [Liu et al., 2020] edo sistema osagarrien kontsumoa [Huang et al., 2017]. Hala ere, erabilitako faktore bakoitza tren linea edo sare bakoitzaren arabera da [Martínez Fernández et al., 2019]. Faktore hauek ia edozein kasutan aplikagarriak diren arren eta eragin handia izan arren, eruedetan gehitzea konplexua izan daiteke. Trenaren masa eta honen aldaketa da adibide bat (bidaiari kopuruaren arabera aldatzen baita), eta energia kontsumoan eragin handia duen arren, nahiko zaila da estimatzea edo eruedetan gehitzea [Martínez Fernández et al., 2019].

Eredu deterministak erabiltzea izan da ohikoena arazo honi aurre egiteko, hurbilketa edo estimazio egokiak lortzen direlako eta ereduaren konplexutasuna handitzea nahiko erraza delako. Alabaina, eredu deterministek aurrez jakinak diren hainbat parametro behar dituzte, eta hauen formulazioaren arabera, soluzioa kalkulatzeko denbora asko behar da batzuetan [Martínez Fernández et al., 2019]. Eredu hauen alternatiba bat sare neuronalak dira. Azken urte hauetan oso erabiliak izan arren, energia-kontsumoari eta tren industriari dagokionez ez dira adibide asko argitaratu. Sare neuronalen abantaila nagusia da behin entrenatuta konputazio kostu txikia behar dutela simulazio asko egin eta emaitza lortzeko; baina entrenamendurako benetako datu fidagarriak behar dira, eta prozesu hori zaila izan daiteke.

Optimizazio problemak zentratuz, lehen pausua problema formalizatzea da. Bertan erabaki behar da zer optimizatu behar den eta zein faktore hartu behar diren kontuan. Horrela, planteatzen den optimizazio problema dimentsio bakarrekoa edo dimentsio anitzekoa izan daiteke, eta aztertutako lan gehienek arabera gutxienez bi helburu funtzio

2.1 Taula: Bigarren hurbilketako parametroak.

Helburua	Aldagaia	Erreferentzia adibidea
Denbora	Geltoki arteko denbora Itxarote-denboraren birbanaketa	[Domínguez et al., 2010] [Sicre et al., 2010]
Energia	Energia-kontsumoa geltoki artean Energia-kontsumoa azpiestazio mailan	[Domínguez et al., 2010] [Domínguez et al., 2012]
Denbora eta energia konbinatuta	ATOkoko abiadura komandoak <i>Coasting</i> puntuak Abiadura-maximoaren profila	[ShangGuan et al., 2015] [Howlett et al., 2009] [Sicre et al., 2014]

hartzen dira kontuan: denbora eta energia [Martínez Fernández et al., 2019]. Bi helburu hauen formulazioan desberdintasunak aurkitu daitezke, batez ere denborari dagokionez. Lan batzuetan geltokien arteko denbora optimizatzeko saiakera egiten da, eta beste batzuetan linea osoko denbora [Cucala et al., 2012]. Bestalde, helburu funtzioak energia eta denbora kontuan hartzen dituen lanetan, estrategia desberdinak erabiltzen dira, ibilbideko hainbat puntutan abiaduran zentratzea [Lu et al., 2013] edo linea automatizatueta ATOko abiadura-komandoak optimizatzea [ShangGuan et al., 2015], esaterako. Laburbilduz, 2.1 taulan azaltzen da [Martínez Fernández et al., 2019] lanaren arabera zein diren optimizazio aldagai nagusiak eta hauen formulazioa.

Hortaz, formalizazioan zentratuz, hainbat aukera planteatzen dira, eta horrela, aipatutakoez gain hainbat lan aurkitu dira energiaren kalkulua estimatzeko proposamenekin. Horietako bat da energiaren optimizazioan soilik ardatzen den lana [Han et al., 1999], non hainbat faktore hartzen diren kontuan, tartean, konstanteak izango ez diren gradienteak (aldapak), kurbak eta abiadura mugak.

Honen arabera, energia-kontsumoaren funtzioaren helburua kontrol-funtzioaren murrizketa jakin batzuk betetzen dituen irtenbide optimoa bilatzea da. Kontrol-funtzioaren moduak hiru izango dira: trakzioa, balazta eta *coasting*. Beraz, geltokien arteko distantzia azpisekzioetan banatzen da, eta helburu funtzioa (energia-kontsumoa) azpisekzio bakoitzeko energia funtzioa eta denboraren batura izatea proposatzen da 2.1 funtzioan agertzen den moduan. Bere gain hartzen dute energia-kontsumoa *coasting* eta trakzio moduen artean soilik egiten dela. Gainera, hiru muga (constraint) gehitzen dira: geltokien arteko distantzia sekzio bakoitzaren berdina izan behar dela, trenak denboran iritsi behar duela eta abiadura muga ezin dela gainditu.

$$J(\Delta x) = \sum_{k=0}^{n-1} E_{C(k+1)} t_{(k+1)} \quad (2.1)$$

non  $C(k+1)$  kontrol-funtzioaren modua den,  $\Delta x$  sekzioen arteko distantzia eta  $t$  sekzio bakoitzeko zirkulazio denbora. Hala ere, azpisekzio bakoitzeko energia kalkulatzeko ekuazio orokor batzuk erabiltzen ditu, eta formalizazioa ulargarria den arren, orain dela 23 urteko artikulu bat da eta energia kontsumoaren kalkulurako ez digu balioko.

Bestalde, [Domínguez et al., 2010] lanean abiadura profil optimoena lortzeko saiakera egiten da energia kontsumoa minimizatzeko helburuarekin, baina kasu honetan, erabiltzen den ATO sistemak parametro bakoitzeko balio diskretu batzuk soilik onartzen ditu, 156 abiadura profilez osatutako soluzio espazio bat eraikiz. Hala ere, trenaren portaera

simulatzeko modelo desberdinak proposatzen dira, tartean ATOaren modeloa (azelerazioa kalkulatzeko), motorraren modeloa, modelo dinamikoa eta energia-kontsumoaren modeloa.

Beste adibide bat da [Liu and Li, 2019] lana, non lau helburu hartzen dituzten kontuan: efizientzia, energia-kontsumoa, konforta eta gelditze zehatza. Hau dena emandako denbora tarte eta abiadura mugak errespetatuz. Problemaren formalizazioari dagokionez, energiaren kalkulurako trakzio eta balazta indarrak integratzen dira, trenaren denbora-errealeko posizioaren arabera (2.2 ekuazioa). Ondoren, aipatutako helburu guztiei dagozkien doitze funtzioekin osatutako doitze funtzioa minimizatzea izango da helburua, aipatutako murrizketak errespetatuz.

$$E_e = \int_0^s (F(k, v) + B(k, v)) ds \quad (2.2)$$

$$f_e = e^{k_e E_e}$$

non  $E_e$  trenaren energia kontsumoa den,  $f_e$  energia-kontsumo doitua,  $k_e$  pisuaren arabera. Horrela, zenbat eta  $f_e$  txikiagoa, orduan eta txikiagoa izango da trenaren energia kontsumoa.

Halaber, aipatu den moduan, ezaugarri asko hartu daitezke kontuan energia minimizatzeke profil egokiak sortzeko. Horren adibide da [Mo et al., 2019] lana, izan ere, bidaiari kopuru dinamikoan eta ausazkoan soilik zentratzen dira, energia kontsumoak trenaren masarekin ere lotura handiak baititu. Horrela, bidaiarien eskariaren ezaugarriak betetzeko, laginetan oinarritutako bidaiarien fluxua eta energia-kontsumoaren modeloak definitu dira. Printzipioz, proiektu honetan ez da kontuan hartuko trenaren masa, eta konstante bat definituko da horren ordez. Hala ere, etorkizunean ezaugarri hau kontuan hartuko da, trenen denbora errealeko pisua lortu daitekeelako.

Era berean, kontuan hartu daitekeen beste ezaugarri bat energiaren birsorkuntza da, [Dominguez et al., 2012] artikuluan azaltzen den moduan. Lan honetan, helburua berriz ere ATOko abiadura profil optimoa sortzea da, balazta birsortzailetik eskuratutako energia kontuan hartuz. Horretarako, sare elektrikoaren eredu bat deskribatzen da, kontsumitutako, birsortutako eta galdutako energia kalkulatzeko.

Bestetik, trakzio/abiadura profilaren kalkuluan hainbat ikuspuntu desberdin aurkitu dira. [Bocharnikov et al., 2007] artikuluan esaterako, bi optimizazio helburu planteatzen dira: denbora eta energia; eta profilaren kalkuluari dagokionez, parametro dinamikoak optimizatzen dira. Parametro dinamiko horiek hiru dira: trakzio-indar faktorea, dezerazio faktorea eta coasting faktorea. Hala ere, proiektu honetan parametro horiek finko mantentzea aurreikusten da, konfort maila ez aldatzeko.

Bide horretan, [ShangGuan et al., 2015] lanean argi azaltzen da nola egin zaion aurre profilen kalkuluari. Abiadura profil optimoaren kalkulurako estrategiak aurkezten dira ibilbidearen ezaugarriaren arabera, bi geltokien arteko sekzioa hainbat azpisekzioetan banatuz, abiadura maximoaren arabera. Erabaki aldagaiei dagokienez, azpisekzio bakoitzerako abiadura balio desberdinak definitzen dira (sarrera, irteera, mantentze eta balazta abiadura), eta honen ondoren trakzio/abiadura profil osoa sortzen da. Proiektu honetan erabilgarria izan daiteke lan hau, helburua berdina delako, baina baloratu egin beharko da, distantzia luzeetan funtzionatzen duen metodo bat dela zehazten baita.

ATOaz gain, tren askotan gidatzea pertsona batek burutzen du, eta [Sicre et al., 2012] artikulua eskuz gidatzen den tren zerbitzu bateko energia-kontsumoa optimizatzeke me-

todo bat proposatzen du. Eredu honek gidariak exekutatzeko komando zerrenda efiziente bat kalkulatzen du *offline*. Horretarako, kurbak, gradienteak, trenbidearen zabalera, trenaren luzera, erresistentziak, motorraren ezaugarriak eta efizientzia kontuan hartzen dira. Gainera, simulatzaile bat sortu da exekuzio denbora eta energia kontsumoa sortzeko, eta benetako neurketekin konparatu dira emaitzak, zehaztasun handia lortuz. Hortaz, lan honek soluzioaren aplikazioan lagunduko ez duen arren, erabilgarria izan daiteke energia eta denboraren kontsumoaren kalkulurako.

### 2.2.2 Optimizazio metodoak

Problema formalizatu ondoren, problema ebazteko metodoak aztertu behar dira. Horretarako, hainbat teknika aipatzen dira aztertutako artikuluetan, bakoitzarekin emaitza desberdinak lortuz. Lehenik, erabili daitezkeen metodorik sinpleena *brute-force* da, hau da, posible den soluzio guztiak kontuan hartzea eta denen helburu balioa kalkulatzea, minimoa (edo maximoa) aurkitzeko [Domínguez et al., 2010, Dominguez et al., 2012]. Hala ere, soluzio guztiak aztertzea bideragarria da soluzio espazioa txikia denean soilik, adibidez, metro sare batzuetan non aukeratzen diren ATOk abiadura profilak multzo mugatu batetik hartzen diren.

Baina optimizazio teknika asko dauden arren, aztertutako lanen gehiengoak metaheuristikoak erabiltzen ditu. Teknika hauek ez dute soluzio optimo globala lortzea ziurtatzen, baina soluzio onak lortu daitezke, informazio mugatua edo konputazio indar mugatua izan arren. Gainera, baliagarriak izan ohi dira soluzio espazioa oso handia denean. Horrela, hauek dira aztertutako lanetan erabiltzen diren metaheuristikoaren aplikazio aipagarrienak:

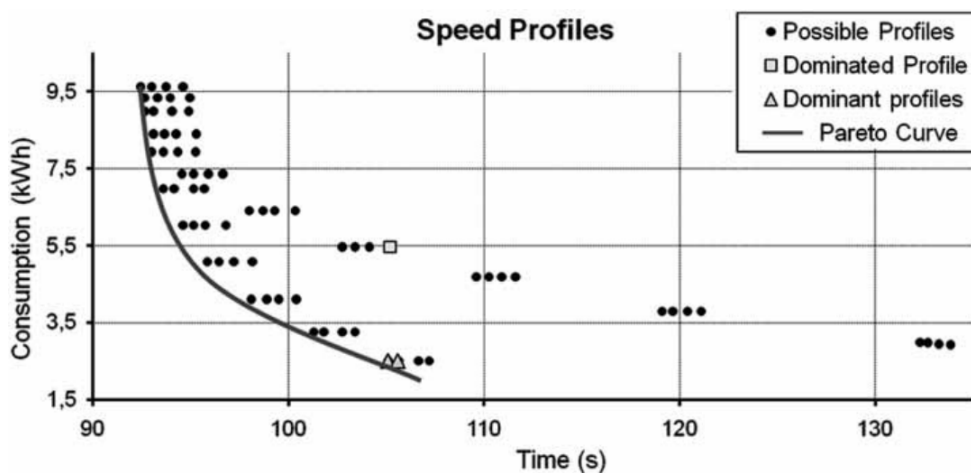
- Genetic Algorithms (GA):

Populazioetan oinarritutako algoritmo hau oso erabilia da abiadura profilaren kalkuluan. Eboluzio biologikoan oinarritzen da, non soluzio indibidualek populazio bat osatzen duten eta doitze funtzio bat definitzen den hauen kalitatea zehazteko. [Han et al., 1999] lanean esaterako, algoritmo genetikoak erabiltzen dituzte coasting kontrol-estrategia erabiliz abiadura profil optimoa lortzeko helburuarekin. Gainera, [Bocharnikov et al., 2007] lanean, 11 belaunaldiren ondoren trakzio energia %31.27 murriztea lortu da denbora %12.5 handituz. Algoritmo desberdinak ere nahasten dira, [Mo et al., 2019] artikuluan adibidez algoritmo nomada (NA) eta algoritmo genetikoaren (GA) konbinazioa erabiliz ebazten dute problema, banaka erabilia baina emaitza hobea lortzen delako.

Orokorrean, lan guztietan algoritmoaren exekuzioa antzekoa da. Hasteko, kromosoma bakoitzeko genomen hasieratze balioak ausaz aukeratzen dira, eta doitze funtzioa (*fitness*) helburu funtzio bakoitzari (*multiobjective* bada) pisu bat aplikatuz definitzen da. Ondoren, artikuluan bakoitzean crossover eta mutazio desberdinak proposatzen dira. Esaterako, crossover-a bi soluzioen batz besteko bidez egitea eta mutazio uniforme aplikatzea [Liu and Li, 2019]; edo crossovera bi kromosometako genoma batzuk elkartrukatzuz egin eta mutazioa genoma baten balioa ausaz aldatuz egitea (beti ere tarte onargarri baten barruan) [Bocharnikov et al., 2007].

- Hybrid Evolutionary Algorithms:

Beste proposamen bat algoritmo hibrido ebolutibo bat erabiltzea da, adibidez, *Differential Evolution* (DE) eta *Simulated Annealing* (SA) algoritmoak konbinatuz



**2.4 Irudia:** Denbora-energia grafikoa, Pareto kurba eta aukeratutako profilak [Domínguez et al., 2010]

[ShangGuan et al., 2015]. Lan horretan, funtsean, SA erabiltzen da DEk lortzen dituen optimo lokaletatik ihes egiteko. Horretarako, lehenik, hasierako populazioa lortzeko, metodo bat sortzen da aurretiko ezagutza eta murrizketak erabiliz.

Metodo guzti hauek aplikatu ondoren, lan askotan prozesu berdina jarraitzen da lortutako soluzioak bistaratu eta onenak aukeratzeko [Domínguez et al., 2010, Dominguez et al., 2012, ShangGuan et al., 2015]. Horrela, soluzio bakoitza denbora-energia grafiko batean errepresentatzen da, eta Pareto kurba definitzen da (2.4 irudia), ondoren komeni denaren arabera soluzio onena aukeratzeko. Adibidez, [Domínguez et al., 2010] lanean, abiadura profil azkarrena eta mantoena kontuan hartuz, beste bi profil aukeratzeko dira, uniformeki kokatuta daudenak, trafiko-sistemaren funtzionamendu leuna bermatzeko.

## 2.3 Proposamena

Gaiaren inguruan egindakoa aztertu ondoren, proiektu honetan zer egingo den deskribatuko da. Hasteko, hainbat aldiz aipatu den moduan, helburua abiadura profilen kalkulua optimizatzea da, trenaren energia kontsumoa minimizatzeke. Bide horretan, enpresan bere garaian garatutako *Itiner* tresna erabiliko da hurbilketen diseinuan laguntzeko. Tresna honek, bi geltokiren arteko profila kalkulatu du analitikoki eta iterazioz iterazio hobetzen joaten da coastinga eta soberako denbora aprobetxatuz. Prozesu honetan energia minimizatzen, eta oinarriko kontrol estrategia batzuk erabiltzen dira horren ordez. Adibidez, alde batera uzten dira ibilbideak eduki ditzaken gradienteak, energiaren kalkuluan gehien eragin dezakeen ezaugarrietako bat. Horregatik, kasu honetan profilaren kalkulua optimoa optimizazio algoritmo baten bitartez kalkulatu nahi da, nahiz eta *Itiner*rek sortzen duen profila oinarritzat hartzea planteatzen den.

Bide horretan, lan honetan proposatzen dena *CAF-Signalling* enpresak dituen beharrei erantzuteko optimizazio problema ebaztea da. Horretarako, lehen pausua profil horiek sortzea da eta, bi ikuspuntutatik hartuko dena. Alde batetik, sekzio edo ibilbide bati dagokion azelerazio profila zuzenean optimizatzea planteatzen da, eta soluzio espazioa azelerazio perfil hori izatea. Bestetik, [ShangGuan et al., 2015] lanaren bide berdina hartzea

## 2. TESTUINGURUA ETA AURREKARIAK

---

proposatzen da, kontsigna abiadurak deituriko parametro batzuk optimizatuz, eta ondoren balaztarik gabeko erregulazio abiaduraren estrategia [[Sicre Vara del Rey, 2013](#)] aplikatzea profil osoa lortzeko.

## Problemaren formalizazioa

Behin testuingurua eta problemaren nondik norakoak azaldu ondoren, problema beraren formalizazioa egin behar da. Aipatu den moduan, bi ikuspuntu planteatu dira soluzio optimoa lortzeko, hemendik aurrera "azelerazioen hurbilketa" eta "kontsigna abiaduren hurbilketa" moduan izendatuko direnak. Hala ere, bi planteamenduek hainbat elementu dituzte komunean, hala nola, kalkuluetarako nahiz murriztapenatarako erabiliko diren parametro batzuk.

### 3.1 Parametro orokorrak

Problema zehatz bat ebazteko, beharrezkoa da hainbat informazio deskribatzea, esaterako, sekzioaren luzera, trenaren masa, gradienteen profila, eta abar. Horregatik, atal honetan kapituluaren zehar agertuko diren hainbat parametro orokor azaldu eta definituko dira, bi ataletan banatuta. Batetik, 3.1 taulan ibilbide edo sekzio bati dagozkion parametroak agertzen dira, ibilbide bakoitzarekiko independenteak direnak. 3.2 taulan, berriz, trenarekiko independenteak diren parametroak deskribatzen dira, kalkuluetarako zein murrizketak betearazteko baliagarriak izango zaizkigunak.

**3.1 Taula:** Ibilbide bati dagozkion parametro orokorrak.

Parametroa	Domeinua	Azalpena
$s$	$\mathbb{N}$	Abiadura muga desberdin kopurua.
$q$	$\mathbb{N}$	Gradiente desberdin kopurua.
$n$	$\mathbb{N}$	Sekzio bateko distantzia-puntu kopurua.
$m$	$\mathbb{N}$	Kontsigna matrizearen errenkada kopurua.
$l$	$\mathbb{R}$	Ibilbidearen edo sekzioaren luzera ( $m$ ).
$T$	$\mathbb{R}$	Ibilbidea burutzeko denbora maximoa.
$V_{max}$	$\mathbb{R}^{s \times 3}$	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga)
$G$	$\mathbb{R}^{q \times 3}$	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradientea)

### 3. PROBLEMAREN FORMALIZAZIOA

**3.2 Taula:** Trenari dagozkion parametro orokorrak.

Parametroa	Domeinua	Azalpena
$p$	$\mathbb{N}$	Trenaren trakzio/balazta ereduko elementu kopurua.
$l_{train}$	$\mathbb{R}$	Trenaren luzera ( $m$ ).
$m_s$	$\mathbb{R}$	Trenaren masa estatikoa ( $kg$ ).
$m_r$	$\mathbb{R}$	Trenaren masa errotatiba ( $kg$ ).
$m_t$	$\mathbb{R}$	Trenaren masa totala ( $kg$ ).
$a, b, c$	$\mathbb{R}$	Trenaren masaren araberako drag konstanteak.
$f_a, f_b, f_c$	$\mathbb{R}$	Drag balio finkoak.
$\alpha$	$\mathbb{R}^2$	Dezelerazio eta azelerazio maximoa ( $m/s^2$ ), konfort arauei jarraituz.
$W_t$	$\mathbb{R}^{p \times 3}$	Trenaren trakzio eredia. Abiadura-tarte bakoitzean ( $m/s$ ) egin dezakeen indar maximoa ( $N$ ).
$W_b$	$\mathbb{R}^{p \times 3}$	Trenaren balazta eredia. Abiadura-tarte bakoitzean ( $m/s$ ) egin dezakeen indar maximoa ( $N$ ).

## 3.2 Elementuen deskribapena

Atal honetan problemaren formalizaziorako beharrezkoak izango diren oinarritzko elementuak deskribatu eta zehazten dira, tartean, askotan aipatu diren eta aipatuko diren profilak.

- Sekzioa. Sekzio edo ibilbide bat tren linea oso baten zati bat da, bi geltoki lotzen dituen zatia, zehazki. Sekzio hauek ezaugarri desberdinak dituzte, tartean, A geltokitik B geltokira bidaiatzeko denbora muga, konstanteak ez diren abiadura mugak eta maldak. Hobeto ulertzeko, fikziozko  $3584.71m$ ko sekzio bat hartuko dugu, eta ondoren azalduko diren kontzeptuak argiago adierazteko 3.1 irudia erabiliko da. Sekzio bat adierazteko, lau profil nagusi erabiltzen dira: distantzia, denbora, abiadura eta trakzio azelerazio profilak. Profil bakoitza  $n$  elementuko bektore baten bitartez adieraziko da eta elementu bakoitzak sekzioan dagokion distantzia adieraziko du.
- Posizio profila (**d**): Profil honen bitartez sekzio baten posizio-puntuak zein diren adieraziko dira metrotan. Profileko elementuen artean distantziak konstanteak izan daitezke ala ez, eta linea osoarekiko balio erlatiboa izango dute, hau da, ez dira 0an hasi eta  $l$ an amaituko.

$$\Lambda = \{\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_n) \in \mathbb{R}^n \mid d_i \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, n\} \quad (3.1)$$

- Denbora profila (**t**): Bektore honetan sekzioko puntu bakoitzean dagokion denbora adierazten da. Denbora balioak segundotan adieraziko dira eta balio inkrementala izan beharko dute.

$$\Delta = \{\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_n) \in \mathbb{R}^n \mid t_i \in \mathbb{R}, t_i < t_{i+1}, i = 1, \dots, n\} \quad (3.2)$$

- Abiadura profila (**v**). Profil honek sekzioko puntu bakoitzean trenaren abiadura definitzen du. Abiadurak esleituta dauden mugak errespetatu behar ditu, orokorrean  $m/stan$  definitzen da, eta 0 eta 44.44 artean mugatzen da, tren bat ez baita  $160km/h$  baino azkarrago ibiliko.

$$\Upsilon = \{\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^n \mid v_i \in [0, 44.44], i = 1, \dots, n\} \quad (3.3)$$



3.3 Taula: Profilen kalkulurako parametro orokorrak.

Parametroa	Domeinua	Azalpena
$i$	$\mathbb{N}$	Dagokion profilaren puntua, $i = 1, \dots, n$ . Hemendik aurrera $i$ . puntua uneko posizioa izango da eta $i-1$ aurreko posizioa.
$d_i$	$\mathbb{R}$	$\Lambda$ multzoko bektore baten $i$ posizioko elementua ( $m$ ).
$v_i$	$\mathbb{R}$	$\Delta$ multzoko bektore baten $i$ posizioko elementua ( $m/s$ ).
$t_i$	$\mathbb{R}$	$\Upsilon$ multzoko bektore baten $i$ posizioko elementua ( $s$ ).
$a_i^{tr}$	$\mathbb{R}$	$\Omega$ multzoko bektore baten $i$ posizioko elementua ( $m/s^2$ ).
$F_i^{rr}, F_i^{gr}$	$\mathbb{R}$	$i$ posizioari dagokion trakzio eta gradiente erresistentziak, hurrenez hurren ( $N$ ).
$F_i^{tr}, F_i^{to}$	$\mathbb{R}$	$i$ posizioari dagokion trenak egin behar duen indarra, trakzioan eta totala, hurrenez hurren ( $N$ ).
$a_i^{tr}, a_i^{dr}, a_i^{to}$	$\mathbb{R}$	$i$ posizioari dagokion trakzio azelerazio, drag dezelerazio eta azelerazio totala, hurrenez hurren ( $m/s^2$ ).
$c_i$	$\mathbb{R}$	$i$ posizioari dagokion trakzio/balazta komandoa.
$j_i$	$\mathbb{R}$	$i$ posizioari dagokion jerk balioa.
$g_i$	$\mathbb{R}$	$i$ posizioari dagokion gradiente balioa.

- Trakzio azelerazio profila ( $\mathbf{a}^{tr}$ ): abiadurak denboraren funtzioan jasaten duen aldaketa adierazten du azelerazioak, eta testuinguru honetan, bi mota daude: trakzio azelerazioa eta *drag* (herrestatze) dezelerazioa. Trakzio azelerazioak trenaren azelerazio teorikoa definitzen du, trenak aplikatzen duen azelerazioa, erresistentziak eta marruskadura kontuan hartu gabe. Drag dezelerazioak, berriz, lau erresistentzia mota hartzen ditu kontuan: kurbak, aerodinamikoa, maldak eta trenbide marruskadura. Horrela, trakzio azelerazioari drag dezelerazioa kenduta trenaren benetako azelerazioa lortuko dugu. Hala ere, profil honen bitartez trakzio azelerazioa soilik definituko da, hau izango baita energiaren kontsumoaren kalkulurako beharrezkoa izango den parametroetako bat. Profileko elementuen mugei dagokienez, konfort balio eta trakzio/balazta ereduaren arabekoak dira,  $a_i^{low}$  eta  $a_i^{up}$  moduan izendatuko direnak.

$$\Omega = \{\mathbf{a}^{tr} = (a_1^{tr}, \dots, a_n^{tr}) \in \mathbb{R}^n \mid a_i^{tr} \in [a_i^{low}, a_i^{up}], i = 1, \dots, n\} \quad (3.4)$$

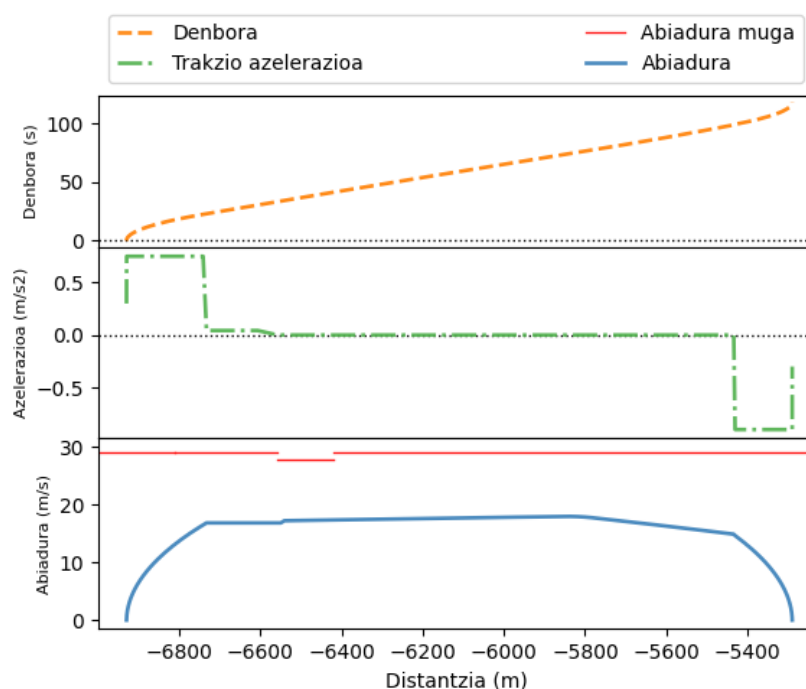
non

$$a_i^{low} = \max(\alpha_1, W_b(v_i)), \quad a_i^{up} = \min(\alpha_2, W_t(v_i))$$

Horrela, azaldutako profilak kalkulatzeko 3.3 taulako parametroak erabiliko dira. Bertan, beharrezkoak diren bektoreen elementuak deskribatzen dira.

Azaldutakoa laburtzeko, 3.1 irudia erabili dezakegu. Bertan 1253.08mko sekzio bat daukagu ( $-5289.76m$  eta  $-4036.68m$  posizioen artean) 96s-tan burutzen dena, eta profil bat irudikatzen da grafiko bakoitzean: denbora, trakzio azelerazioa eta abiadurarena, hurrenez hurren. Goiko grafikoak posizio bakoitzari dagokion denbora adierazten du, Otik hasi eta sekzioa burutzeko behar izan den denborara arte ( $T$  baino txikiagoa izan behar du). Ondoren, trenaren trakzio azelerazioa adierazten da, eta kasu honetan, hasieran trakzio maximoa aplikatzen da (konfort eta trakzio/balazta ereduaren arabera); sekzioaren erdi aldean azeleraziorik ez da aplikatzen (*coasting* deitzen zaiona), eta amaieran azelerazio negatibo maximoa aplikatzen da, trena behar den toki zehatzean gelditzeko. Azkenik, azken grafikoan trenaren posizio bakoitzeko abiadura irudikatzen da lerro jarrai lodiaren bitartez,

### 3. PROBLEMAREN FORMALIZAZIOA



3.1 Irudia: Adibideko sekzioko lau profilak, distantzia-profila X ardatzean kokatuta.

eta puntu bakoitzeko abiadura muga lerro jarrai mehez. Grafiko honetan argi erakusten da zein den trenaren abiaduraren bilakaera, eta baita erresistentzia eta marruskadurek zein eragin duten (batez ere *coasting*a aplikatzen denean abiadura jaisten delako).

### 3.3 Kontsumo energetikoaren kalkulua

Proiektuaren zatirik garrantzitsuenetako bat tren batek sekzio batean izango duen energia kontsumoaren estimazioa egitea da. Estimazio horrek ahalik eta zehatzena izan behar du, ondoren benetan soluzioa aplikagarria izan dadin. Horregatik, CAF enpresako energia departamentutik helarazitako ekuazioak aplikatuko dira estimazioa egiteko, [Orbegozo del Río, 2015] master tesian deskribatzen direnak, zehazki.

Energia kontsumoa zenbat den jakiteko, katenariatik kontsumitu den energia zenbatekoa izan den kalkulatu behar da, gurpiletatik hasi eta energia kontsumitzen duten osagai guztietatik pasatuz. Orokorrean bi tren mota daude, bakoitza arkitektura desberdin batekin, nahiz eta desberdintasuna txikia den. Lehen arkitekturan, elementu osagarrien kontsumoa iragazki edo filtroen ondoren kokatzen da, eta bigarren arkitekturan, berriz, iragazkien aurretik. Hala ere, elementu osagarrien kontsumoa ez da sortzen den profilararen arabera ia aldatzen, horregatik, arbuigarria izango da eta ez da kontuan hartuko gure kalkuluetan.

Energia kontsumitzen duten treneko osagaiak 6 dira. Zehazki, hasieran katenariatik jasotzen du trenak energia elektrikoa, iragazkiak trenbide-sareko perturbazioak arintzeko erabiltzen dira, inbertsoreek korrante zuzena korrante alternora bihurtzen dute, motorrak energia elektrikoa mekanikora bihurtzen du eta erreduktoreek motorren abiadura nabarmen murrizten dute gurpiletara iritsi arte. Elementu bakoitzaren energia kontsumoa kalkulatzeko bi modu desberdin daude: batetik, osagai bakoitzaren errendimendua

aplikatzen zaio aurreko kontsumoari estimazio bat lortzeko, edo bestalde, osagai horrek dituen galerak gehitzen zaizkio kontsumo osoa lortzeko. Dena dela, kalkulua azaltzen hasi aurretik, atal honetan erabili eta aipatuko diren elementuen deskribapen labur bat egingo da 3.4 taulan.

**3.4 Taula:** Kontsumo energetikoaren kalkulurako beharrezko parametroak.

Parametroa	Domeinua	Azalpena
$k$	-	Tren baten osagaiak deskribatzeko zerrenda. $k$ = (gurpilak, erreduktorea, motorra, inbertsorea, iragazkia, katenaria).
$P_k(a_i^{tr}, v_i)$	$\mathbb{R}$	$k$ osagaiaren potentzia $i$ puntuan (kW), azelerazioa eta abiaduraren arabera.
$F_{gurpil}$	$\mathbb{R}$	Gurpilak egin behar duen indarra, hau da, trakzio indarra (kN).
$R_{tr}, R_{gr}$	$\mathbb{R}$	Trenbide ( $R_{tr}$ ) eta gradienteen ( $R_{gr}$ ) erresistentzia indarrak (kN).
$\tau_i$	$\mathbb{R}$	Motorrek $i$ puntuan $v_i$ abiadura duten momentu handiena, ( $N \cdot m$ ).
$\eta_k(v_i/A)$	$\mathbb{R}$	$k$ osagaiaren efizientzia faktorea, abiaduraren ( $v_i$ ) edo korrontearen ( $A$ ) arabera.
$Galerak_k(v_i, T)$	$\mathbb{R}$	$k$ osagaiaren galerak, abiadura ( $v_i$ ) eta momentuaren ( $T$ ) arabera.

Beraz, kontsumoaren estimaziorako kate bat jarraitu behar dugu, daukagun informazioaren arabera 3.5 taulako formulak jarraituz. Hala ere, kontuan hartu behar da modu honetan puntu bateko potentzia kalkulatzeko delako ( $kW$ ), hau da, une jakin batean elementu eroaleetatik igarotzen den energia kantitatea. Horregatik, kontsumoa kalkulatzeko puntu bakoitzeko potentzia erabili den denboraz biderkatu behar da, orduetan,  $kWh$  unitatean lortzeko.

**3.5 Taula:** Puntu bakoitzeko potentziak kalkulatzeko ekuazioak.

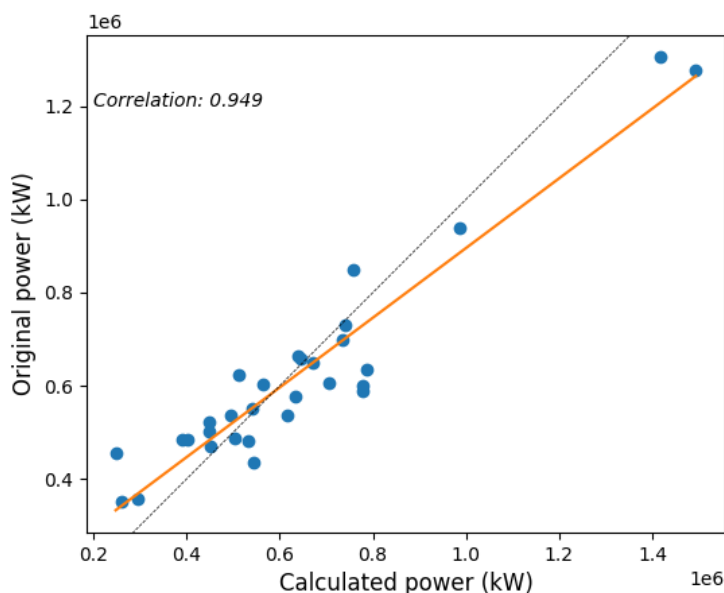
Gurpilak	$F_{gurpil} - (R_{tr} + R_{krb} + R_{gr}) = M_{tren} \quad (3.5)$ $P_{gurpil}[kW] = F_{gurpil}[kN] \cdot v_i[m/s] \quad (3.6)$
Erreduktorea	<p><b>Errendimenduak aplikatuz:</b>  <math>P_{gurpil}</math> negatiboa bada:</p> $P_{erred} = P_{gurpil} \cdot \eta_{erred}(v_i) \quad (3.7)$ <p><math>P_{gurpil}</math> positiboa bada:</p> $P_{erred} = \frac{P_{gurpil}}{\eta_{erred}(v_i)} \quad (3.8)$

### 3. PROBLEMAREN FORMALIZAZIOA

Motorra	<p><b>Errendimenduak aplikatuz:</b>  <math>P_{erred}</math> negatiboa bada:</p> $P_{motorra} = P_{erred} \cdot \eta_{motorra}(v_i) \quad (3.9)$ <p><math>P_{erred}</math> positiboa bada:</p> $P_{motorra} = \frac{P_{erred}}{\eta_{motorra}(v_i)} \quad (3.10)$ <p><b>Galeren matrizea aplikatuz:</b></p> $P_{motorra} = P_{erred} + Galera_{k_{motorra}}(v_i, T)^1 \quad (3.11)$
Inbertsorea	<p><b>Errendimenduak aplikatuz:</b>  <math>P_{motorra}</math> negatiboa bada:</p> $P_{bus\_trak} = P_{motorra} \cdot \eta_{inbertsore}(v_i) \quad (3.12)$ <p><math>P_{erred}</math> positiboa bada:</p> $P_{bus\_trak} = \frac{P_{motorra}}{\eta_{inbertsore}(v_i)} \quad (3.13)$
Iragazkia	<p><b>Errendimenduak aplikatuz:</b>  <math>P_{bus}</math> negatiboa bada:</p> $P_{kat\_trak} = P_{bus\_trak} \cdot \eta_{iragazki}(v_i) \quad (3.14)$ <p><math>P_{erred}</math> positiboa bada:</p> $P_{kat\_trak} = \frac{P_{bus\_trak}}{\eta_{iragazki}(v_i)} \quad (3.15)$
Katenaria	$P_{katenaria} = P_{kat\_trak} \quad (3.16)$

Bestalde, ekuazio hauek definitu diren arren, hauen efizientzia frogatu beharra dago, izan ere, benetako tren batek ematen dituen datu errealekin konparatuko dira lortzen diren profilen kontsumoak. Horregatik, eskuragai dauden probetako hainbat eszenario hartu ditugu, eta profil hauen kontsumoak konparatu ditugu, originalak eta deskribatutako

<sup>1</sup>Galera motor bakoitzeko ematen dira. Normalean tren bakoitzak bi motor izaten ditu.



**3.2 Irudia:** Kontsumo originala eta kalkulatuaren arteko korrelazio grafikoa.

**3.7 Taula:** Lehen hurbilketako parametro espezifikoak

Parametroa	Domeinua	Azalpena
$l_{stop}$	$\mathbb{R}$	Soluzio-bektorea amaituko den posizio erlatiboa, geldialdi zehatza bete dadin ( $m$ )
$a_{stop}$	$\mathbb{R}$	$l_{stop}$ posiziotik amaierara geldialdi zehatza egiteko trenak mantendu beharko duen azelerazioa ( $m/s^2$ ).
$d_{step}$	$\mathbb{R}$	Profiletako puntuen arteko distantzia tartea, metrotan.

ekuazioekin kalkulaturakoak. Emaitzak konparatzeko, 3.2 irudia sortu da, non X ardatzean ekuazioekin kalkulatu den kontsumoa agertzen den, eta Y ardatzean trenak emandako benetako kontsumoa (kWh-etan). Ondoren, lerro jarrai laranjaren bitartez erregresio lerro zuzena irudikatzen da, eta lerro eten beltzak  $x = y$  lerroa irudikatzen du. Emaitzak aztertuz, orokorrean, datuek 0.951 eko korrelazioa mantentzen dute, eta kontsumoen arteko erlazioa  $[0.8, 1.1]$  artekoa da puntu guztietan. Ondorioz, emaitzak berdinak ez diren arren, proposatutako metodoa onartzen da eta proiektu osoan zehar modu honetara kalkulatu dira energia kontsumoak.

### 3.4 Azelerazioen hurbilketa

Proposatutako hurbilketak eta arrazoiak gogoratzearen, aipatu bi hurbilketa planteatu direla energia kontsumoa minimizatzeke profila sortzeko, eta lehenengoan trakzio azelerazio balioak optimizatuko direla zuzenean. Bigarrenean, berriz, distantzia eta kontsigna abiadura batzuk optimizatuko dira, eta hauetatik eratorriko da trakzio azelerazio profila.

Kalkuluetan zehazki sakondu aurretik, hurbilketa honetan erabiliko diren hainbat elementu eta parametro deskribatzen dira 3.7 taulan.

Hasteko, soluzio bat lortu aurretik  $d$  distantzia bektorea kalkulatu behar da, sekzio

bakoitzeko berdina izango dena. Horretarako, sekzio bakoitzaren  $l$  luzera,  $d_{step}$  puntuen arteko tartea eta hasierako posizio distantzia jakin behar dira. 3.17 ekuazioan deskribatzen da nola lortu  $n$  balioa, hurbilketa honetako soluzio eta bektore guztiek izango duten luzera. Ondoren, distantzia bektoreko elementu bakoitzari dagokion distantzia balioa esleituko zaio, 3.18 ekuazioan agertzen den moduan.

$$n = \frac{l}{d_{step}} \quad (3.17)$$

$$d_i = d_0 + d_{step} \cdot i \quad (3.18)$$

Lehen hurbilketa honetan, beraz, sekzioko puntu bakoitzeko trakzio azelerazio balioak aldatuz optimizatuko dira profilak. Trakzio azelerazioa oinarritzko magnitude bat da, eta bertatik kalkulatu daitezke gainerako elementu guztiak. Horregatik, trakzio azelerazioa izango da optimizazio aldagaia. Behin  $\Omega$  multzoko soluzioa daukagula, beste profilak kalkulatu beharko dira, murriztapenak betetzen diren ala ez ikusteko eta helburu funtzioaren bitartez energia kontsumoa estimatzeko.

Hala ere, beharrezkoa da helburuko geltokian geldialdi zehatza egitea, hau da, abiadura 0 izan behar du zehazki azken puntuan. Horregatik, lanak errazte aldera, soluzioko azelerazio profila ez da  $l$  distantziako puntuan amaituko, aurrez definitu den puntu batean baizik,  $l_{stop}$  deituko dioguna (orokorrean amaiera baino 50m lehenago), eta puntu horretatik amaierara beharrezkoa den azelerazio konstante bat aplikatuko zaio azken puntu zehatzean abiadura 0 izan dadin.

### 3.4.1 Gainontzeko profilen kalkulua

$\Omega$  multzoko soluzio bat emanik, lehen puntuaren abiadura eta denbora definitu behar dira, posible baita trena martxan dagoela profila birkalkulatzeari, arazo edo atzerapenen bat egon delako. Ondoren, puntuz puntu kalkulatu dira gainontzeko profilak, hurrengo sekuentzia jarraituz:

1. Denbora: aurreko denborari ( $t_{i-1}$ ) egindako distantzia ( $d_i - d_{i-1}$ ) aurreko puntuko abiaduran ( $v_{i-1}$ ) egiteko behar den denbora gehitu behar zaio, 3.19 ekuazioan egiten den moduan.

$$t_i = t_{i-1} + \frac{d_i - d_{i-1}}{v_{i-1}} \quad (3.19)$$

2. Azelerazioa: soluzioan daukagun azelerazioa trakzioarena da, hau da, trenak aplikatuko duen azelerazioa. Horri, aipatu den moduan, dragek eragiten duten dezelerazioa kendu behar zaio, eta kasu honetan, sinplifikatzeko, bi drag mota bakarrik aplikatu dira: trenbide marruskadura eta gradienteen (aldapen) eraginez egiten den erresistentzia.

- a) Trenbidearen erresistentzia edo *rolling resistance*: 3.20 ekuazioaren bitartez, trenbideak trenari eragiten dion indarra kalkulatu da, trenaren pisua eta abiaduraren bitartez. Gainera, tren bakoitzerako independenteak diren konstanteak aplikatu dira, bai pisuaren arabera zein zuzenean.

$$F_i^{rr} = f_a + (a \cdot m_s) + (f_b + (b \cdot m_s)) \cdot v_i + (f_c + (c \cdot m_s)) \cdot v_i^2 \quad (3.20)$$

- b) Gradienteen erresistentzia: 3.21 ekuazioarekin orografiak trenarekiko duen erresistentzia kalkulatu daiteke. Modu honetan, gradiente negatiboarekin trenaz azeleratu egingo da eta alderantziz, gradiente positiboarekin balaztatu.

$$F_i^{gr} = m_s \cdot 9.8 \cdot \frac{g_i}{1000} \quad (3.21)$$

Kalkulatutako erresistentzia hauek indarrak dira, Newtonetan neurtuta, eta dezelerazioa lortzeko, bi indarrak gehitu eta Newtonen bigarren legea aplikatu daiteke (3.22 ekuazioa):

$$a_i^{dr} = \frac{F_i^{rr} + F_i^{gr}}{m_t} \quad (3.22)$$

Horrela, behin drag dezelerazioak lortuta, trenak izango duen benetako azelerazioa lortuko dugu:

$$a_i^{to} = a_i^{tr} - a_i^{dr} \quad (3.23)$$

3. Abiadura: aurreko puntuko azelerazio totala ( $a_{i-1}^{to}$ ) eta puntuen arteko distantzia ( $d_i - d_{i-1}$ ) jakinda, 3.24 ekuazioaren bitartez kalkulatu dezakegu zein den trenaren abiadura puntu berrian.

$$v_i = \sqrt{2 \cdot a_{i-1}^{to} \cdot (d_i - d_{i-1}) + v_{i-1}^2} \quad (3.24)$$

4. Indarra: balio hauekin trenak egin behar duen indarra kalkulatu dezakegu, osoa edo trakziokoa soilik, aurreko puntuan azaldu den Newtonen bigarren legea aplikatuz masa totala ( $m_t$ ) eta uneko azelerazioa erabiliz (3.25 ekuazioa).

$$F_i^{tr} = \frac{m_t}{a_i^{tr}} \quad (3.25)$$

$$F_i^{to} = \frac{m_t}{a_i^{to}}$$

5. Trakzio komandoa: komando honekin trenak aplikatu beharko duen trakzioa definitzen da  $[-1, 1]$  tartean, hau da, zenbat azeleratu eta balaztatu behar duen. Horretarako, uneko indarra tren jakin batek abiadura jakin batean burutu dezakeen indar maximoaz zatitzen da, 3.26 ekuazioan egiten den moduan.

$$c_i = \begin{cases} \frac{F_i^{tr}}{W_i(v_i)}, & \text{if } a_i^{tr} > 0 \\ \frac{F_i^{tr}}{W_i(v_i)}, & \text{if } a_i^{tr} < 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.26)$$

6. Jerk balioa: bidaiarien erosotasuna mantentzeko, garrantzitsua da azelerazio aldaketak handiak ez izatea, eta horretarako erabiltzen da jerk balioa, uneko eta aurreko azelerazio totalaren diferentzia pasa den denboraz zatituz (3.27 ekuazioa):

$$j_i = \frac{a_i^{to} - a_{i-1}^{to}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3.27)$$

Hala ere, proiektu honetan ez da jerk balioa inplementatuko, sortuko diren azelerazio profiletan ez baita gidatze leuntasuna lehenbat izango, eta treneko kontrola arduratuko da hori betearazten.

7. Geldialdi zehatza: aipatu den moduan, tren helburuko geltokian ( $l$ ) zehatz gelditu dadin sekzioaren puntu batetik ( $l_{stop}$ ) amaierara ez da optimizatuko. Horren ordez, uneko abiadura eta amaierarako distantzia hartuta, guztiz gelditzeko trenak hartu beharko duen azelerazio osoa kalkulatu da 3.28 ekuazioa erabiliz.

$$a_{stop} = \frac{-v_i^2}{2 \cdot (l - l_{stop})} \quad (3.28)$$

Ondoren, drag dezelerazioak kalkulatu dira eta  $a_i^{tr} = a_{stop} + a_i^{dr}$  ekuazioaren birtatez trenaren trakzio azelerazioa kalkulatu da. Hortik aurrera, aurreko puntuetan aipatu diren ekuazioak erabiliko dira gainerako balioak kalkulatzeko.

### 3.4.2 Optimizazio problema

Beraz, ekuazio guzti hauekin deskribatutako 4 profilak izango ditugu, baina jakiteko ea benetan baliagarriak diren ala ez, hainbat murriztapen betetzen dituztela ziurtatu behar da. Murriztapen horiek honako hauek izango dira, eta soluzio bakoitzak eta bertatik eratortzen diren profil guztiek bete beharko dituzte.

- $c1$ : Abiadura maximoak errespetatzea. Nahitaezkoa izango da abiadura maximoak ez gainditzea, horregatik, trenaren abiadurak ezingo du gainditu puntu horri dagokion abiadura muga. Horrez gain, abiadurak beti positiboa izan behar du, azken puntuan izan ezik (trena gelditu dela frogatzeko), bestela ezin baita frogatu tren helburuko geltokira iritsi dela.

$$0 < v_i \leq V_{max}(d_i) \text{ if } i < n \quad (3.29)$$

- $c2$ : Amaierako abiadurak 0 izan beharko du, sortuko diren profiletan trenak gelditu amaitu behar duelako. Hasierako abiadura posible da 0 ez izatea, tren martxan dagoela profila birkalkulatu baldin bada, arazo edo atzerapen batengatik.

$$v_n = 0 \quad (3.30)$$

- $c3$ : Denbora muga errespetatu. Trenek puntuala izan behar dute eta profil osoa burutzeko trenak beharko duen denborak ezingo du gainditu esleituta dagoen denbora maximoa.

$$t_n - t_0 \leq T \quad (3.31)$$

- $c4$ : Konfort maila errespetatu. Bidaiarien segurtasun nahiz erosotasunerako garrantzitsua da muga batzuk errespetatzea eta hori neurtzeko bi balio hartuko dira kontuan: azelerazio maximoa eta minimoa.

$$a_i^{to} \in [\alpha_1, \alpha_2] \quad (3.32)$$

- $c5$ : Trenaren trakzio/balazta eredua errespetatu. Trenek mugak dituzte eta ezin dute nahi dugun beste abiadura edo azelerazio lortu, horregatik, beharrezkoa da abiadura bakoitzean trenak egin dezakeen indar maximoa errespetatzea.

$$\begin{cases} F_i^{to} \leq W_t(v_i), & \text{if } a_i^{to} > 0 \\ F_i^{to} \leq W_b(v_i), & \text{if } a_i^{to} < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$



Hurbilketa honi dagozkion atal guztiak azaldu ondoren, problema bera formalizatuko dugu. Horretarako, helburu funtzioa deskribatuko da lehenik. Aipatu moduan, profil bat emanda, puntuz puntu kontsumitzen den energia kalkulatu behar da eta ondoren dena batu 3.34 ekuazioan definitzen den moduan. Puntu bakoitzeko energia kontsumoa kalkulatzeko 3.5 taulan azaltzen diren ekuazioak erabili behar dira, puntu bakoitzeko azelerazioa eta abiadura erabiliz. Bi parametro hauetaz gain, kontuan hartzekoak dira 3.1 eta 3.2 tauletan deskribatu diren parametroak, beharrezkoak baitira hainbat potentzia kalkulatzeko.

Beraz,  $\Omega$  multzoko  $x$  soluzio bat eta  $x_i$  soluzioaren  $i$  posizioko elementua izanik, honako helburu funtzioa izango dugu:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n P_{\text{kateneria}}(a_i^{tr}, v_i) \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (3.34)$$

non

- $a_i^{tr}$  trenaren  $i$  posizioko trakzio azelerazioa den, hau da, soluzio bateko  $i$  posizioko balioa,  $x_i$  zehazki.
- $v_i$  trenaren  $i$  posizioko abiadura den eta 3.24 ekuazioan azaltzen den moduan kalkulatu da,
- $t_i$  eta  $t_{i-1}$  uneko eta aurreko denbora diren, 3.19 ekuazioa erabiliz kalkulatu,
- eta  $c_1, c_2, c_3, c_4$  eta  $c_5$  betetzen diren.

Ondoren, optimizazio problema formalizatu behar da. Funtsean, hainbat aldiz aipatu den moduan, problemaren xedea helburu funtzioko balio txikiena duen  $\Omega$  multzoko soluzioa bilatzea da, honek bete behar dituen murriztapenak kontuan hartuz.

$$x^* = \arg \min_{x \in \Omega} f(x) \text{ subj. to } c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 \quad (3.35)$$

## 3.5 Kontsigna abiaduren hurbilketa

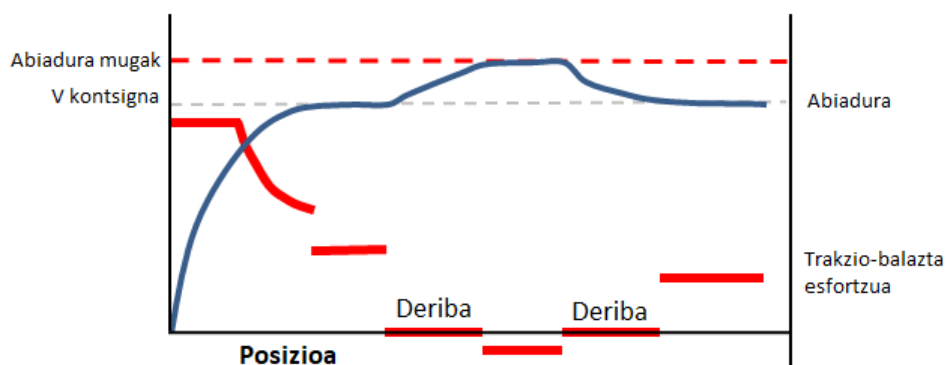
Bigarren hurbilketaren helburu garrantzitsuena aurreko estrategiak sor ditzaken soluzio baliogabe kopurua murriztea da, eta zuzenean profila optimizatu ordez, kontsigna abiadura eta posizioak optimizatzea da, eta ondoren balaztarik gabeko erregulazio abiaduraren estrategia aplikatzea profil osoak lortzeko.

### 3.5.1 Balaztarik gabeko abiaduraren erregulazioa

Balaztarik gabeko abiaduraren erregulazioa izeneko gidatze strategiaren funtsa gutxienez abiadura kontsigna bati eusteko behar den trakzio-efortzua aplikatzea da (betiere, abiadura mugen barruan), hala, drag balioek abiadura horri eusteko trakzio-efortzua egitea eskatzen badute, aplikatu egingo da. Aitzitik, trenbidearen malda dela eta, abiadura mantentzeko balazta aplikatu beharko balitz, ez litzateke aplikatuko eta deriba edo *coasting* moduan joango litzateke trena, kontsigna abiaduraren gainetik.

Trenbideko abiadura maximoak une oro errespetatu behar dira, beraz, une jakin batean abiadura maximo hori lortuko balitz, hura ez gainditzeko behar den balazta aplikatuko

### 3. PROBLEMAREN FORMALIZAZIOA



3.3 Irudia: Balaztarik gabeko abiaduraren erregulazioa aplikatzen duen adibide bat.

3.8 Taula: Bigarren hurbilketako parametroak.

Parametroa	Domeinua	Azalpena
$u$	$\mathbb{N}$	Kontsigna matrizeko elementu zenbakia, $u = 1, \dots, m$ .
$z$	$\mathbb{N}$	Distantzia, denbora, abiadura eta trakzio azelerazio profilen luzera, denboraren arabera aldatzen dena.
$j$	$\mathbb{N}$	Kalkulatu diren profilen elementu zenbakia $j = 1, \dots, z$ . Hemendik aurrera $j$ . posizioa uneko posizioa izango da eta $j - 1$ aurreko posizioa.
$d_j, t_j, v_j, a_j^{tr}$	$\mathbb{R}$	$\Lambda, \Delta, \Upsilon$ eta $\Omega$ multzoko distantzia, denbora, abiadura eta trakzio azelerazio bektoreen $j$ posizioeko elementua, hurrenez hurren.
$\Delta t$	$\mathbb{R}$	Profiletako puntuen arteko tartea, segundotan.

litzateke. Era berean, trena *coasting* moduan dagoela abiadura kontsignara iritsiko balitz, abiadura horri eusteko trakzio aplikatuko litzateke berriz. Estrategia honen errepresentazio bat ikusi daiteke 3.3 irudian. Bertan, kontsigna abiadura eta abiadura muga konstanteak dira, hasieran gorakorra den lerroak trenaren abiadura adierazten du, eta lerro jarrai lodiak puntu bakoitzean egiten den trakzio esfortzua, trenbidearen maldaren arabera aldatuko dena, abiadura bi lerro eten horien artean mantentzeko.

Estrategia hau inplementatzeko, hainbat sinplifikazio hartu behar dira kontuan. Esate baterako, beti aplikatuko den trakzio abiadura maximoa izango da (konfort eta trakzio/balazta ereduaren arabera), abiadura mantendu behar denean izan ezik; kasu horretan, drag dezelerazioak eragiten duenaren aurkakoa izango da, azelerazio totala 0 izan dadin.

#### 3.5.2 Simulatzailearen inplementazioa

Estrategia inplementatzeko hainbat pausu jarraitu behar dira. Hasteko, kontsigna matritzea edo soluzioa izango dena definitu behar da. Soluzio bakoitzak bi bektore izango ditu, posizioa eta kontsigna abiadura. Bektore bakoitzaren luzera berdina izango da, eta zein izango den definitzeko, sekzio bakoitzeko probak egingo dira *offline*. Hala ere, inplementazioan sakondu aurretik, hurbilketa honetan erabiliko diren hainbat elementu eta parametro deskribatzen dira 3.8 taulan.

Horrela, hasteko soluzioa definitzen den multzoak definituko dira jarraian:

$$\Xi = \{\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \dots, \omega_n) \in \mathbb{R}^m \mid \omega_u \in [0, l], u = 1, \dots, m, \omega_{u-1} < \omega_u\}$$

$$\Pi = \{\boldsymbol{\phi} = (\phi_1, \dots, \phi_n) \in \mathbb{R}^m \mid \phi_u \in [v_{min}, 44.44], u = 1, \dots, m\}$$

$$\Gamma = \{(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\phi}) \mid \boldsymbol{\omega} \in \Xi, \boldsymbol{\phi} \in \Pi\}$$

Horrenbestez, behin  $\Gamma$  soluzio multzoa definituta, profil simulatzailea inplementatu daiteke balaztarik gabeko abiadura erregulazioaren estrategia jarraituz. Balaztatu behar den zatietan, hots, sekzioaren amaieran eta abiadura mugen aldaketa batzuetan, aurrez profil zati batzuk definitu dira, aurretik atzera, azelerazio maximoa erabiliz. Horrela, trakzioko kurba honekin gurutzatzen denean dezelerazio maximoa aplikatuko du abiadurak errespetatu daitezen. Dena den, azelerazio eta dezelerazio maximoak trenaren trakzio/balazta modeloaren arabera definitzen dira, abiadura desberdinetan indar desberdina egin dezakeelako tren bakoitzak. Horregatik, 3.25 ekuazioa erabiliz kalkulatu dugu zein den azelerazio eta dezelerazio maximoa, indar maximoa eta trenaren pisu totalaren arabera.

Energia kontsumoa kalkulatzeko beharko dugun abiadura eta azelerazio profila kalkulatzeko puntuen arteko tartekak denborak definituko ditu, eta beti konstantea izango da. Gainera, hasierako abiadura eta azelerazioa zein izango diren definitu beharko dira (defektuz  $0m/s$  eta  $0.3m/s^2$ ), eta honela, puntuz puntu hauek izango dira denbora, abiadura eta distantzia kalkulatzeko formulak, hurrenez hurren:

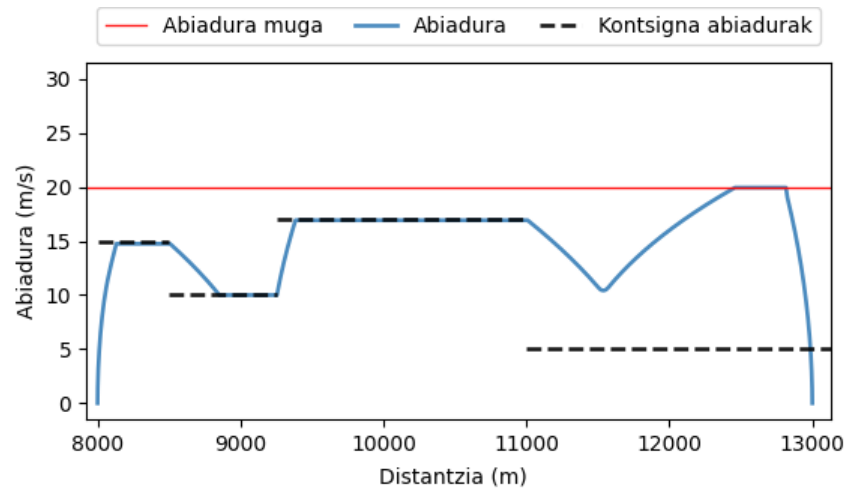
$$\begin{aligned} t_j &= t_{j-1} + \Delta t \\ v_j &= v_{j-1} + a_{j-1}^{to} \cdot (t_j - t_{j-1}) \\ d_j &= d_{j-1} + v_{1j} \cdot (t_j - t_{j-1}) \end{aligned} \tag{3.36}$$

Ondoren hurrengo puntuko azelerazioa definitu behar da. Azaldu den moduan, kontsigna abiadurara iritsi behar da eta balaztarik ez aplikatu abiadura maximoa gaintzen ez den bitartean. Horregatik, honako estrategia hau jarraituko da azelerazioa definitzeko:

- Uneko abiadurak muga gaintzen badu dezelerazio edo balazta maximoa aplikatuko da. Baldintza hau segurtasun moduan ipini da, teoriarik ez baitu inoiz muga gaintu beharko.
- Uneko abiadura mugan baldin badago, eta drag dezelerazioak negatiboak badira (malda beherakoa bada), dezelerazio hori berdinduko da totala 0 izan dadin eta abiadura mantendu dezan.
- Uneko abiadura kontsigna abiadura baino txikiagoa bada, azelerazio maximoa aplikatuko da abiadura horretara heltzeko.
- Aurreko baldintzak betetzen ez badira, trenaren kontsigna abiadura eta maximoaren artean dagoelako izango da, eta kasu honetan, azelerazioa 0 izango da eta coasting-a aplikatuko da.

Bestetik, kontuan hartu beharko da sortzen ari den profilak aurrez kalkulatuak balazta profil horietakoren bat gurutzatzen badu balaztatzen hasi beharko duela, eta hortaz, balazta profil hori gehituko zaio atzetik, denborak egoki kalkulatu ondoren.

### 3. PROBLEMAREN FORMALIZAZIOA



**3.4 Irudia:** Implementazio hau jarraitzen duen adibideko profil baten emaitza.

3.4 irudiko adibidean ikusi daiteke implementazioaren jokaera eta ematen duen emaitza. Adibidez, lerro jarrai lodienak trenaren uneko abiadura adierazten du, hasieran eta amaieran 0 izango direlarik. Ondoren, lerro jarrai meheak abiadura mugak adierazten ditu, kasu honetan beti konstantea da, 20m/s-an. Abiadura hau, noski, ezin da inoiz gainditu. Azkenik, lerro etenak sekzioan zehar dauden kontsigna abiadurak zehazten ditu. Laburrean, kontuan hartuta gradientea 11500m-rarte positiboa dela eta ondoren negatiboa, ikusten da hasieran abiadura kontsigna balioen muga doala, baina amaierako zatian, gradiente aldaketa aprobetxatzen da eta abiadura maximore azeleratzeko aldapa aprobetxatzen duela.

#### 3.5.3 Optimizazio problema

Bigarren estrategia honen optimizazio problema aurrekoaren antzekoa da, izan ere aurrez aipatu diren  $c1$ ,  $c2$ ,  $c3$ ,  $c4$  eta  $c5$  murriztapen guztiak bete behar dituzte soluzioek.

Beraz, diseinatu den abiadura-azelerazio profil horiek zein energia kontsumo izango duten definitzeko aurreko atalean bezala, 3.5 taulako ekuazioak erabiliko dira puntu-puntu potentziak kalkulatzeko, eta igarotako denboraz bidertuko dira kontsumoa lortzeko. Ondoren, puntu guztietako kontsumoak batuko dira eta proposatutako soluzioaren helburuko balioa lortuko da.

$\Gamma$  multzoko  $y$  soluzio bat izanik, honako helburu funtzioa izango dugu:

$$h(y) = \sum_{j=1}^z P_{katenaria}(a_j^{tr}, v_j) \cdot \Delta t \quad (3.37)$$

non

- $a_j^{tr}$  trenaren  $j$  posizioko trakzio azelerazioa den eta 3.5.2 zerrendan deskribatzen den irizpideak jarraituz definitzen den,
- $v_j$  trenaren  $j$  posizioko abiadura den eta 3.36 ekuazioan azaltzen den moduan kalkulatu den,

- eta  $c_1, c_2, c_3, c_4$  eta  $c_5$  betetzen diren.

Amaitzeko, optimizazio problema definituko da. Kasu honetan,  $h()$  funtzioa erabiliko da soluzioa ebaluatzeko, eta problemaren xedea helburu funtzioko balio txikiena duen  $\Gamma$  multzoko  $y^*$  soluzioa bilatzea izango da, bete behar dituen murriztapenak errespetatuz.

$$y^* = \arg \min_{y \in \Gamma} h(y) \text{ subj. to } c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 \quad (3.38)$$



# Algoritmoa

Atal honetan, definitu diren bi optimizazio problemak ebazteko erabili den algoritmoa deskribatuko da, hau erabakitzeko erabili diren arrazoiak eta baita estrategia bakoitzari aurre egiteko hartu diren erabakiak ere.

## 4.1 Sarrera

Bi hurbilketak ebazteko Differential Evolution (DE) izeneko algoritmoa aplikatu da, aldaketa txiki batzuekin. Algoritmo hau sinplea eta inplementatzeko erraza da, eta gainera, argitaratutako proben arabera algoritmo azkarra da, egokia lehen hurbilketan dauzkagun eskala-handiko soluzioak azkar ebazteko. 1996. urtean egin zen algoritmo honen lehen aipamena, Kenneth V. Price fisikariak argitaratutako [Price, 1996] lanean.

DE algoritmoak algoritmo genetikoaren (GA) oinarriak ditu. GAK eboluzio biologikoan eta hauen oinarri genetiko-molekularrean inspiratzen dira eta horrela, mutazio eta gurutzaketa genetikoaren bitartez, irizpide batzuekin batera, soluzio onenek belaunaldietan zehar biziraun egiten dute, eta okerrenak baztertu egiten dira. Orokorrean, lau pausu jarraitzen dira mota honetako algoritmoetan. Hasteko, soluzio multzo bat (populazioa) hasieratzen da, gehienetan ausaz. Ondoren, populazio hori ebaluatzen da helburu funtzio baten bitartez, eta onenen aukeraketa bat egiten da. Hurrengo urratsa bigarren belaunaldiko populazioa sortzea da, aurreko populazioari operazio genetikoaren konbinazio bat aplikatuz: gurutzatze kromosomikoa (crossover edo birkonbinazio ere esaten zaio) eta mutazioa. Horrela belaunaldiak igaro ahala, helburua soluzioak hobetzen joatea izango da, gelditzea erabakitzen den arte. Algoritmoa amaitzeko, gelditze estrategia bat aplikatu behar da, eta orokorrean 3 hauek erabiltzen dira: belaunaldi kopuru maximoa, exekuzio denbora, hainbat belaunalditan hobekuntzarik ez izatea.

Gauzak horrela, DE algoritmoa inplementatzea egokia iruditu da, teoriarik, duen sinpletasun eta exekuzio denbora txikiengatik. Gainera, kasu honetan helburu funtzioaren exekuzio denbora nahiko handia da, eta beraz, egokia da ahalik eta dei gutxien egitea helburu funtzioari. Bestetik, lehen hurbilketari dagokionez, aipatu den bezala, soluzio bektoreak dimentsio handikoak dira, eta horregatik, komeni da eskala-handiko optimizazio problemak ebatzi ditzaken algoritmo bat inplementatzea. [Sepesy Maučec and Brest, 2019]

## 4. ALGORITMOA

**4.1 Taula:** Differential Evolution algoritmorako beharrezko parametroak.

Parametroa	Domeinua	Azalpena
$p$	$\mathbb{N}$	Populazio tamaina.
$n, m$	$\mathbb{N}$	3.1 taulako $n$ eta $m$ parametroak. Azelerazioen eta kontsigna abiaduren hurbilketako soluzioaren dimentsioa, bektore bakoitzaren parametro kopurua, hurrenez hurren. Azelerazioen hurbilketaren kasuan, sekzioaren luzeraren arabera aurrez kalkulaten da.
$f$	$\mathbb{R}$	Eskala-konstantea, gurutzaketatik lortutako balioak perturbatzeko, $0 < f \leq 1.2$
$rc$	$\mathbb{R}$	Gurutzaketa-konstantea, ausazko zenbaki batekin konparatuz gurutzaketa burutu ala ez erabakitzeko konstantea, $0 \leq rc \leq 1$ .
$max\_it$	$\mathbb{N}$	Iterazio kopuru maximoa.
$max\_im$	$\mathbb{N}$	Hobekuntzarik gabeko iterazio kopuru maximoa.

artikuluan DE eta haren hobekuntzak eskala-handiko optimizazio problema desberdinetan ebaluatzen dira, zehazki 1000 dimentsiotako 15 problemetan. Ikerketa honen arabera, DE berrituen errendimendua oso ona dela bistakoa den arren, DE algoritmo oiriginalak oraindik ere errendimendu azpimarragarria dauka eskala-handiko optimizazio problemak ebazterako garaian.

Bestetik, aipatu behar da bigarren hurbilketa ez dela eskala handiko problema bat, eta gehienez ere 8 dimentsioko soluzioak izango ditugula. Hala ere, soluzio hauetan beharrezkoa da elementuen artean erlazio bat mantentzea, bai posizio balioetan (goranzko ordenan egon behar dute), eta baita kontsigna abiadura balioetan ere. Horregatik, DE algoritmoak populazioko bektoreen arteko kenketa egiten duenez, belaunaldi berriak aurrekoekin nolabait erlazonatuta daude, nahiz eta egiaztatu eta zuzendu beharko diren. Amaitzeko, bi hurbilketa konparatu nahi direnez, aukerarik egokiena bi hurbilketei algoritmo berdina implementatzea da, eta aipatu diren abantailak kontuan hartuta, algoritmorik egokiena DE dela erabaki da. Dena den, sarreran aipatu den moduan, proiektu honen funtsa problemaren formalizazioan zentratzen da eta horrek definituko ditu lortuko diren emaitzak, algoritmoaren aukeraketak berak baino.

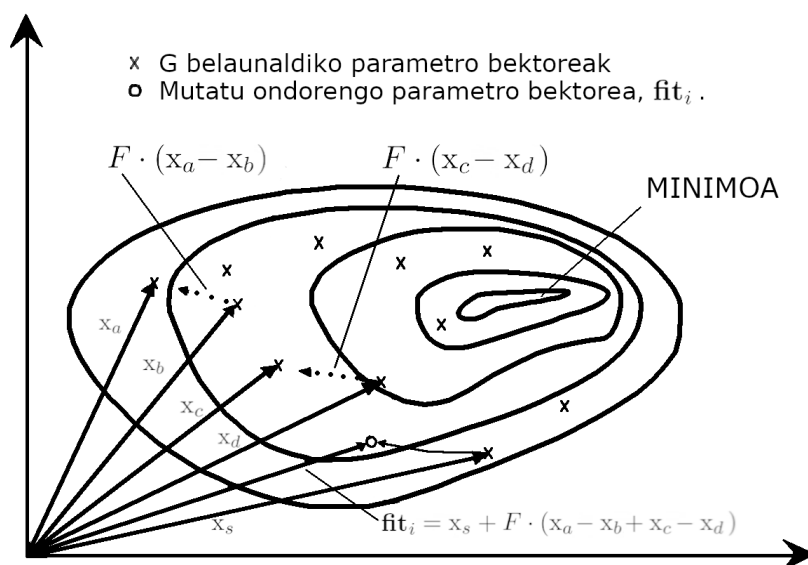
## 4.2 Algoritmoaren diseinu orokorra

Differential Evolution algoritmoak lau parametro behar ditu, 4.1 taulan deskribatzen direnak: populazio tamaina ( $p$ ), soluzioaren dimentsioa ( $n$  edo  $m$ ), eskala-konstantea ( $f$ ) eta gurutzatze-konstantea ( $rc$ ). Lau parametro hauekin, soluzioak perturbatzeko, algoritmoak ausazko bektore diferentziak gehitzen ditu. Ondoren, soluzio berriak ebaluatzen dira eta hobetu diren bektoreak onartu, nahiz eta *simulated annealing* moduko algoritmoen moduan irizpide bat jarri daitekeen okerragoak diren soluzioak ere onartzeko.

Gainera, algoritmoa gelditzeko irizpide bat behar da, eta kasu honetan iterazio kopuru mugatu bat jartzea erabaki da. Horretaz gain, hainbat iteraziotan soluzioa hobetu ez bada ere algoritmoa gelditu egingo da.

4.1 irudian ikusi daiteke algoritmoaren ilustrazio bat ideia orokor bat egiteko. Bertan dauzkagu populazioko hainbat elementuren balioak ( $X$  batez markatuta), eta baita aukeratu diren belaunaldi horretako 4 bektoreak ere. Ondoren, gurutzaketa eta mutazio operazioak





4.1 Irudia: *Differential Evolution* algoritmoaren oinarritzko eragiketen ilustrazioa.

egingo dira eta soluzio berri bat sortuko da.

Hasi aurretik, egingo diren azalpenei laguntzeko, 1 sasikodea gehitu da, egindako inplementazioaren inguruan zehaztasun gehiago emateko. Bi hurbilketa izan arren, inplementazioa oinarrian berdina da, eta horregatik azalpen guztiak lehen sasikode honen gainean emango dira. Hala ere, bigarren hurbilketarako aldaketa batzuk egin direnez, 2 sasikodea osatu da egindako aldaketa garrantzitsuenak azpimarratzeko.

Hasteko, 9-10 lerroetan ikusten den moduan, populazioa hasieratu eta ordenatu behar da, eta kasu honetan osaketa hori ausaz egiten da, baldintza batzuk kontuan hartuz. Bi hurbilketen soluzioak desberdinak dira, eta bide horretan, bakoitzaren populazioa hasieratzeko metodoak ere desberdinak dira. Azelerazioen hurbilketari dagokionez, ausazko zenbakiak sortu dira posizio bektoreko elementu bakoitzerako, beti ere konfort balio mugen artean. Bestetik, kontsigna abiaduren hurbilketako bi soluzio bektoreak sortzeko ausazko zenbakiak erabiltzen dira, baina murrizketa batzuk kontuan hartuz. Hasteko, distantzia bektorea sortzen da, eta horretarako ausazko  $m$  zenbaki lortzen dira, haien artean aurrez definitutako distantzia minimo bat errespetatuz. Ondoren, posizio bakoitzeko, abiadura bat esleitzen da ausaz, minimoa eta puntu horretako maximoaren artekoa.

Segidan, populazioko elementu bakoitza ebaluatzen da definitutako helburu funtzioaren bitartez, eta emaitzak gordetzen dira. Posible da hasieran sortu den populazio horretako elementuak ez bideragarriak izatea, baina hala ere, gorde eta ebaluatu egingo dira, nahiz eta adieraziko den ez direla bideragarriak. Hasierako populazioa osatu eta ebaluatu ostean ordenatu egingo da emaitza onenetik txarrenera. Kasu honetan estrategia desberdin bat jarraituko da bideragarriak eta ez bideragarriak diren soluzioen artean. Hasieran bideragarriak ordenatuko dira, kontsumo txikienetik handienara, eta atzetik bideragarriak ez direnak, kontsumo handienetik txikienera. Irizpide honen arrazoi nagusia bideragarriak ez diren kontsumo txikieneko soluzioak negatiboki asko eragiten dutela da, izan ere, orokorrean, kontsumo txikiko soluzioek denbora muga baino askoz denbora gehiagoko profilak sortu ohi dituzte. Hasierako fasearekin amaitzeko, ordenatutako populazioa gordetzen da

$\mathbf{x}$  bektorean.

Algoritmoaren exekuzioarekin hasteko, 14 lerroan, aipatutako belaunaldi maximoak eta hobekuntza belaunaldi maximoak baldintzatzen duen begizta bat ezartzen da, gelditzeko irizpideak bete daitezzen. Horrela, belaunaldi bakoitzean populazioko elementu bat hartuko da eta bertatik abiatuta soluzio berriak proposatuko dira.

Aipatu den moduan, DE algoritmoaren mutazioaren funtsa diferentzia bektorea da. Bektore pare bakoitzak ( $\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b$ ) diferentzia bektore bat definitzen du ( $\mathbf{d}_{ab}$ ) non:

$$\mathbf{d}_{ab} = \mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b \quad (4.1)$$

Horrela, 16 lerroan ikusten da, mutazioa burutzeko, populazioko lau bektore desberdin aukeratzen direla ausaz,  $\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b, \mathbf{x}_c$  eta  $\mathbf{x}_d$ , edozein  $a, b, c$  eta  $d$ -rako. Behin bektore hauek izanda, konbinatu egiten dira  $\mathbf{d}_{abcd}$  lortuz, adibidez:

$$\mathbf{d}_{abcd} = \mathbf{d}_{ab} + \mathbf{d}_{cd} = (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b) + (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_d) \quad (4.2)$$

Hala ere, konbergentzia ahalik eta azkarrena bermatzeko,  $\mathbf{d}_{abcd}$  eskala-faktore batez biderkatzen da, non ( $0 < f \leq 1.2$ ). Goiko muga enpirikoki erabakia izan da, ez baita aurkitu 1.2 balioa baino handiagoa behar izan duen funtziorik. Gainera, [Price, 1996] artikuluan aipatzen da  $f = 0.5$  balioa erabilia problema asko azkar ebatzi daitezkeela. Beraz, behin  $f$  eskala-faktorea definitu dela, soluzio on bati gehitzen zaio, soluzio hobe bat lortzeko helburuarekin. Kasu honetan, 17 lerroan ikusten da zein estrategia jarraitu den soluzio hori lortzeko, populazioko lehen laurdeneko ausazko soluzio bat hartzea, onenen arteko bat,  $\mathbf{x}_s$  izendatuko dena.

$$\mathbf{fit} = \mathbf{x}_s + f * \mathbf{d}_{abcd} \quad (4.3)$$

Dena den, 18 eta 27. lerroen artean ikusten den moduan, mutazio eta gurutzaketa operazioak ez dira bektore guztiaren gainean egiten, elementuz elementu baizik. Hala ere, ez da elementu guztiakin egiten, eta bektoreko zein parametroren gainean egingo den erabakitzeak  $cr$  konstantea erabiltzen da. Konstante hau algoritmoaren hiperparametro bat da eta bektoreko  $j$  elementu bakoitzeko  $[0, 1]$  tarteko ausazko zenbaki errealekin konparatzen da. Ausazko zenbakia  $cr$  baino txikiagoa bada,  $j$  elementuarekin aipatutako operazioak burutuko dira, eta  $cr$  baino handiagoa bada, uneko  $\mathbf{x}_i$  bektoretik kopiatuko da balioa zuzenean.

Horrela, soluzio berri bat sortu eta ebaluatzen da, eta bideragarria bada, populazioan gehituko da. Ondoren, populazioko hurrengo bektorea aukeratuko da eta prozesua errepikatuko da populazio guztia iteratu arte.

Belaunaldi oso bat igaro ostean, populazioa berriz ordenatzen da hasieran aipatutako irizpideen bitartez eta hasierako populazio tamaina berreskuratzen da. Soluzio onena hobetu den ala ez egiaztatzeko, berriz, aurreko populazioko lehenengo soluzioa populazio berriko lehenengo soluzioarekin konparatzen da, eta beharrezko eguneraketak egiten dira. Amaitzeko, gelditze baldintzak egiaztatzen dira eta algoritmoa gelditu edo ez erabakitzen da.

### 4.2.1 Azelerazioen hurbilketa

Hurbilketa honen implementazioa diseinu orokorrean azaldu denaren berdina da, soluzioa adierazteko bektore bakar bat erabiltzen delako.

---

#### Algorithm 1 Differential Evolution algoritmoaren sasikodea

---

```

1: Input:
2:  $p$ : Populazio tamaina
3:  $n$ : Dimentsioa, bektoreko parametro kopurua (kalkulatua)
4:  $f$ : Eskala-konstantea  $0 < cr \leq 1.2$ 
5:  $cr$ : Gurutzaketa-konstantea,  $0 \leq cr \leq 1$ 
6:  $\mathbf{x}$ : Populazioa, eta haien helburu balioak
7: fit: Proba bektorea, eta bere helburu balioa
8: Hasieratzea:
9:  $\mathbf{x} \leftarrow \text{populazioa\_hasieratu\_eta\_ebalatu}(p, n)$ 
10:  $\mathbf{x} \leftarrow \text{ordenatu}(\mathbf{x})$ 
11:  $\text{last\_best} \leftarrow \mathbf{x}[0]$  ▷ Azken soluzio onena gordetzeko aldagai auxiliarra
12:
13: Exekuzioa:
14: while  $\text{generation} < \text{max\_it} \ \& \ \text{improvement} < \text{max\_im}$  do
15:   for  $i$  in  $\text{range}(p)$  do
16:      $\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b, \mathbf{x}_c, \mathbf{x}_d$ :  $x$  populazioko 4 elementu ausaz.
17:      $\mathbf{x}_s$ :  $x$  populazioko lehen laurdeneko ausazko soluzio bat.
18:      $j \leftarrow \text{random}(0, n - 1)$ 
19:     for  $k$  in  $\text{range}(n)$  do
20:       if  $(\text{random}(0, 1) < cr) \ \parallel \ (k == n)$  then
21:          $d_{abcd} \leftarrow \mathbf{x}_a[j] - \mathbf{x}_b[j] + \mathbf{x}_c[j] - \mathbf{x}_d[j]$  ▷ Gurutzaketa
22:          $\text{fit}[j] \leftarrow \mathbf{x}_s[j] + f * d_{abcd}$  ▷ Perturbazio + mutazioa
23:       else
24:          $\text{fit}[j] \leftarrow \mathbf{x}[i][j]$ 
25:       end if
26:        $j \leftarrow (j + 1) \% n$  ▷ Hurrengo parametroa
27:     end for
28:      $\text{ebalatu\_soluzioa}(\text{fit})$ 
29:     if  $\text{fit}$  is valid then ▷ Soluzio berria bideragarria bada
30:        $\mathbf{x}.\text{gehitu}(\text{fit})$  ▷ Populazioan gehitu
31:     end if
32:   end for
33:    $\mathbf{x} \leftarrow \text{ordenatu}(\mathbf{x})$ 
34:   if  $\mathbf{x}[0] < \text{last\_best}$  then ▷ Soluzio onena hobetu den ala ez begiratu
35:      $\text{improvement} \leftarrow 0$ 
36:   else
37:      $\text{improvement} ++$ 
38:   end if
39:    $\text{last\_best} \leftarrow \mathbf{x}[0]$ 
40:    $\text{generation} ++$ 
41: end while

```

---

### 4.2.2 Kontsigna abiaduren hurbilketa

Planteatu diren bi hurbilketak antzeko implementatu diren arren, kontuan hartzekoa da kontsigna abiaduren hurbilketa implementatzeko bi bektore optimizatu behar direla, eta horregatik aldaketa txiki batzuk egin dira algoritmoan. Aldaketa nabarmenena soluzioa bi bektorek osatzen dutela da, baina eragiketa guztiak berdinak dira, nahiz eta bi aldiz egin behar diren operazioak, bektore bakoitzarekin bat. Zehatzagoak izateko, 2 sasikodeko 15 eta 18 lerroen artean ikusi daite gurutzaketa eta mutazioa burutzeko kalkuluak bi bektoretan paraleloan egiten direla.

---

**Algorithm 2** Differential Evolution algoritmoaren sasikodea, bigarren hurbilketa

---

```
1: Input:
2: ...
3: Hasieratzea:
4:  $\mathbf{x}, \mathbf{v} \leftarrow \text{populazioa\_hasieratu\_eta\_ebalatu}(p, m)$   $\triangleright$  Populazioa sortu, distantzia
   eta kontsigna abiadura balioekin
5:  $\mathbf{x}, \mathbf{v} \leftarrow \text{ordenatu}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ 
6:  $\text{last\_best} \leftarrow \text{onena}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$   $\triangleright$  Azken soluzio onena gordetzeko aldagai auxiliarra
7:
8: Exekuzioa:
9: ...
10:  $\mathbf{x}_a, \mathbf{v}_a, \mathbf{x}_b, \mathbf{v}_b, \mathbf{x}_c, \mathbf{v}_c, \mathbf{x}_d, \mathbf{v}_d$ : populazioko 4 elementu pare ausaz.
11:  $\mathbf{x}_s, \mathbf{v}_s$ : populazioko lehen laurdeneko ausazko soluzio bat.
12: ...
13: for  $k$  in  $\text{range}(m)$  do
14:   if  $(\text{random}(0, 1) < cr) \parallel (k == m)$  then
15:      $dx_{abcd} \leftarrow \mathbf{x}_a[j] - \mathbf{x}_b[j] + \mathbf{x}_c[j] - \mathbf{x}_d[j]$   $\triangleright$  Distantzia
16:      $dv_{abcd} \leftarrow \mathbf{v}_a[j] - \mathbf{v}_b[j] + \mathbf{v}_c[j] - \mathbf{v}_d[j]$   $\triangleright$  Kontsigna abiadura
17:      $\text{fit\_x}[j] \leftarrow \mathbf{x}_s[j] + f * dx_{abcd}$ 
18:      $\text{fit\_v}[j] \leftarrow \mathbf{v}_s[j] + f * dv_{abcd}$ 
19:   else
20:      $\text{fit\_x}[j] \leftarrow \mathbf{x}[i][j]$   $\triangleright$  i. elementuko distantzia parametroa
21:      $\text{fit\_v}[j] \leftarrow \mathbf{v}[i][j]$ 
22:   end if
23:   ...
24: end for
25:  $\text{ebalatu\_soluzioa}(\text{fit\_x}, \text{fit\_v})$ 
26: ...
```

---

# Esperimentazioaren prestaketa

Atal honetan, aurkeztu den problema eta hau ebazteko metodoak bideragarriak diren ala ez erabakitzeko baliatuko diren instantziak definituko dira. Instantzia bat problemaren partikularitate bat da, problemari dagokion planteamendu bat. Kasu honetan, instantziak 3.2 atalean aipatu diren sekzio edo ibilbideek definitzen dituzte, bakoitzari dagozkion parametro batzuekin; eta horrela, atal honetan mota eta ezaugarri desberdinetako instantziak definituko dira, egingo diren galderei ahalik eta modu zehatzenean erantzuteko.

## 5.1 Instantziak

Azpiatal honetan instantzia mota desberdinak definituko dira. Batetik, benetako probetan oinarritutako ibilbideak izango dira, bertan aplikatu den profil eta egindako kontsumo originalekin, eta bestetik, asmatuak diren sekzioak gehituko ditugu, algoritmoak proban jartzeko.

Ibilbide edo instantzia bakoitza zehatz azaldu aurretik, instantzia guztietan balio berdina izango duten parametroak definituko ditugu. Parametro hauek trenari dagokion informazioa deskribatzen dute, proba guztietan tren berdinak erabili baitira. Trenaren energia kontsumoa kalkulatzeko behar diren errendimendu eta galera balio generikoak erabili dira esperimentazio osoan zehar, izan ere, ez dira definitutako trenaren balio zehatzak lortu. Beraz, 5.1 taulan aurkitu genezake trenari dagozkion parametro garrantzitsuenak. Asmatutako instantziei dagokienez, tren parametro berak erabiliko dira, lanak errazteko.

Behin trenaren ezaugarriak azaldu ondoren, aukeratu diren instantzien deskribapen zabal bat egingo da. Aipatu den moduan, instantzia batzuk benetako probetatik ateratakoak dira, baina beste batzuk asmatu egin dira, algoritmoen jokaera ebaluatzeko. Azpimarratu behar da sortu diren instantzia guztiek dutela soluzio bideragarriren bat, horretarako diseinatu dira. Hasierako instantziak Zeelanda Berriko Auckland hiriko tren linea batean oinarrituko dira. *CAF Signalling* enpresak hainbat proba egin izan ditu han eta horregatik benetako ibilbide eta trenen inguruko informazioa dago. Gainera, proba hauetan, benetako energia kontsumoaren informazioa ere gorde ahal izan da eta *log* ia guztietan trenaren puntu bakoitzeko benetako energia kontsumoa kontsultatu daiteke. Gainera, ibilbide desberdinak daude, luzera desberdinetakoak, gradiente aldaketa eta abiadura muga aldaketa

## 5. ESPERIMENTAZIOAREN PRESTAKETA

**5.1 Taula:** Erabiliko den trenari dagozkion parametroen balioak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$p$	56	
$l_{train}$	72m	
$m_s$	132760kg	
$m_r$	9834kg	
$m_t$	142594kg	$m_t = m_s + m_r$
$a, b, c$	0.012, 0, 0	
$f_a, f_b, f_c$	0, 171.68, 5.81	
$\alpha$	(-0.9, 0.9)	
$W_t$	(0, 7.5, 408000), (7.5, 8, 397570), (8, 8.5, 377124), (33.5, 34, 139695), (34, 34.5, 139695), (34.5, 35, 139695)	Trenaren trakzio eredua. Abiadura tarte bakoitzari indar maximo bat esleitzen zaio. Adibidez, 0 eta 7.5m/s-ko tartean trenak 408000N-eko indarra egin dezake gehienez.
$W_b$	(0, 13, 400000), (13, 14, 397190), (14, 15, 373777), ..., (28, 29, 215540), (29, 30, 209888), (30, 35, 204601)	Trenaren balazta eredua. Abiadura tarte bakoitzari indar maximo bat esleitzen zaio.

desberdinekin, eta ibilbide errealetan oinarrituta daudenez, benetako geltokien izenak erabili dira hauek izendatzeko. Lehen 4 instantziak 2021eko abenduaren 12an egindako probetako datuetatik sortu dira, eta beste biak berriz, 2021eko azaroak 27an egindako probetako datuetatik. Ondoren, benetakoak ez diren beste 6 instantzia sortu dira, eta hainbat ezaugarri probatzeko erabiliko dira, tartean, gradiente aldaketa handiak, denbora soberan edo oso mugatua duten ibilbideak, abiadura muga jauzi handiak dituztenak eta abar. Instantzia hauek asmatuak diren arren, benetako geltokien izenak emango zaizkie hobeto identifikatzeko, baina orokorrean zenbakiaren arabera izendatuko dira dokumentu osoan zehar.

Hala ere, jarraian adierazgarriak diren hiru instantzia definituko dira (1, 8 eta 11. instantziak), asko ez luzatzearren. Gainontzeko bederatzi instantziak, berriz, B eranskinean deskribatuko dira. Zenbakien izendapenari dagokionez, eranskinean aipatzen den ordena hartuko da kontuan.

### 1. Takanini - Te Mohia

Sekzio hau nahiko motza da, 1639m-koa, hain zuzen. Hala ere, 100 eta 110km/h arteko abiadura mugak daude, eta orografiari dagokionez, ia ibilbide osoak gradiente negatiboa dauka, nahiz eta balio txikikoak diren. Gainera, sekzio hau burutzeko 122s-ko tarte ematen da.

5.2 Taula: 1. instantziako (Takanini - Te Mohia) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	4	
$q$	4	
$l$	1639.9m	
$l_{stop}$	1589.9m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	122s	
$V_{max}$	(-7219, -6811, 29.1), ..., (-6420, -5106, 29.1)	Abiadura mugen eredia (posizio-tartea, abiadura muga). Adibidez, -7219m eta -6811m-en artean 29.1m/s-ko (105km/h) abiadura muga dago.
$G$	(-7526, -6811, -2), ..., (-5856, -4026, 10)	Gradiente eredia (posizio-tartea, gradiente). Kasu honetan, esaterako, -7526 eta -6811m-en artean ‰ -2ko gradiente dago.

## 8. Lugaritz - Errekalde BRT20

Asmatua den instantzia hau 6000m luze da, eta guztiz laua den ibilbidea dauka. Denborari dagokionez, abiadura maximoan joaten denean lortuko duen denbora zehatza, Best Running Time (BRT) deitua, baina ‰20 gehiago eman zaio, 455s. Abiadura maximoak, berriz, 36 eta 110m/s artean aldatzen dira.

5.3 Taula: 8. instantziako (Lugaritz - Errekalde BRT20) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	6	
$q$	1	
$l$	6000m	
$l_{stop}$	5950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	455s	
$V_{max}$	(0, 2000, 30), (6500, 7500, 10)	Abiadura mugen eredia (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(0, 18000, 0)	Gradiente eredia (posizio-tartea, gradiente).

## 11. Zumaia - Deba BRT10

8000m-ko instantzia honetan BRT baino ‰10 gehiagoko denbora eman zaio, 538s. Gradiente nahiko aldakorra dauka, izan ere, gradiente positiboarekin hasten da sekzioa baina amaierako zatian gradiente negatibo handia dago. Amaitzeko, abiadura mugei dagokienez, 35 eta 110km/h-ko abiadura mugak aurkitu daitezke.

5.4 Taula: 11. instantziako (Zumaia - Deba BRT10) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	7	
$q$	2	
$l$	8000m	
$l_{stop}$	7950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	538s	
$V_{max}$	(0, 2000, 30), (7500, 13500, 20)	Abiadura mugen eredia (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(0, 2500, 20), (2500, 8000, -30)	Gradiente eredia (posizio-tartea, gradiente).

## 5.2 Parametroen doiketa

Esperimentazioaren aurretik, algoritmoak behar dituen parametroen doiketa bat egin da. Doiketa honen helburua esperimentaziorako ahalik eta parametro-baliorik egokienak izatea da, emaitzarik onenak lortzeko. Hasteko, parametro doiketa diseinatuko da, eta ondoren lortutako emaitzak azalduko dira, *heatmap* motako irudien bitartez. Bigarren hurbilketa erabili da exekuzioetarako, izan ere, egin diren aurretiazko esperimentuetan argi ikusi da lehenengoaren aldean emaitza hobekak lortzen direla.

### 5.2.1 Prestaketa

Parametroen doiketa burutzeko 3 instantzia aukeratu dira (2, 5 eta 11. instantziak), eta *grid search* izeneko metodo bat erabili da. Hiru instantzia hauek aukeratzeko arrazoi nagusia hirurak desberdinak direla da, bai distantziari dagokionez, eta baita gradiente eta abiadura mugei dagokionez ere. Beraz, doitu nahi diren parametroak honako hauek dira: populazio tamaina, bektore dimentsioa (kontsigna abiaduren hurbilketaren kasuan soilik), eskala konstantea eta gurutzaketa konstantea.

Ondoren, parametro bakoitzeko tarte bat definitu da, probatu nahi diren balioak gordeko dituen tarte bat, honako hauek zehazki:

- Populazio tamaina,  $p = \{20, 50, 100\}$
- Bektore dimentsioa,  $m = \{2, 4, 8\}$
- Eskala konstantea,  $f = \{0.2, 0.5, 1.2\}$
- Gurutzaketa konstantea,  $cr = \{0.2, 0.5, 1\}$

Horrela, algoritmoa martxan jarri daiteke tarte horietako parametro balio guztiak probatuz eta datu guztiak fitxategi batean gordez. Konbinazio bakoitza 5 aldiz exekutatu da instantzia bakoitzerako, ausazko funtzioaren haziak exekuzio zenbaki berdinetan mantenduz.

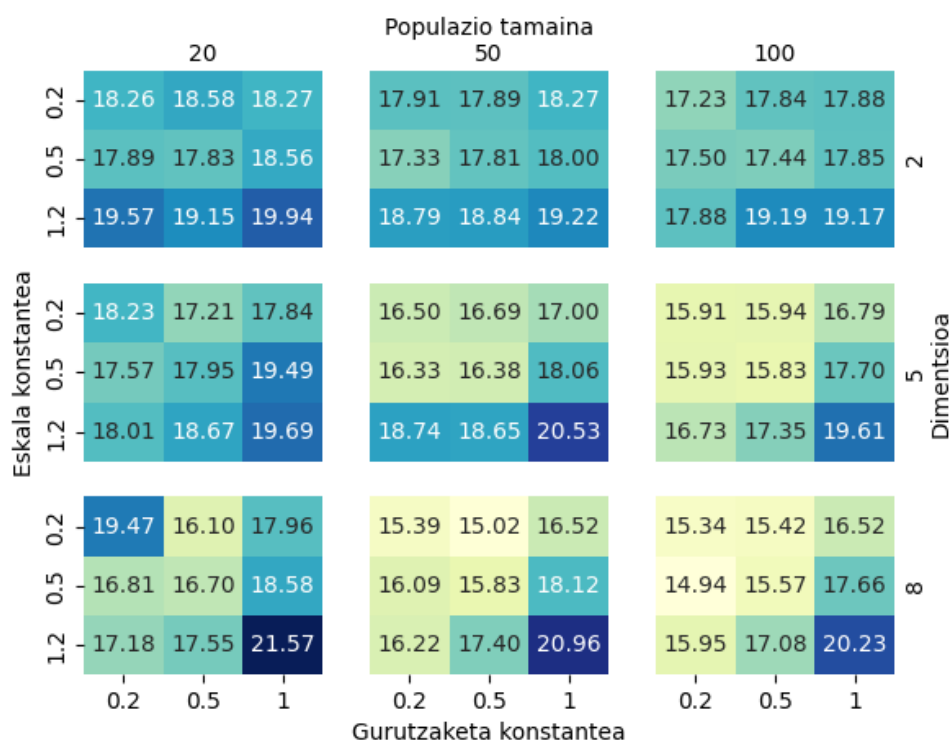
Datu guztiak CSV fitxategi batean gorde dira, ondorioak ateratzeko beharrezkoa izango zaigun informazioarekin, hau da, erabili den parametro konbinaketa eta lortu den helburu balioa. Instantzia bakoitzeko CSV fitxategi bat sortu da, eta ondoren fitxategi guztietako helburu balioen batz bestekoa egin da emaitzak interpretatzeko.

Amaitzeko, test guztiak egiteko enpresak helarazitako ordenagailu eramangarri bat erabiliko da, *Intel Core i5-5200U* prozesadorea, *8.0GB DDR3*ko RAM memoria, *TOSHBA HDD 500GB* disko gogorra eta *Intel HD Graphics 5500* GPUarekin.

### 5.2.2 Emaitzak

Parametro konbinaketa guztiak exekutatu ondoren, eta informazio guztia bilduta, datuak interpretatu behar dira. Horretarako, egokia ikusi da *heatmap* motako irudiak erabiltzea, izan ere, modu oso argian erakusten du konbinazio bakoitzaren artean dauden aldeak eta zein eragin daukan parametro bakoitzak helburu balioan. Aipatu den moduan, 2, 5 eta 11. instantziak erabili dira doiketa hau burutzeko, eta emaitza moduan 5.1 irudia osatu da, honako banaketa honekin: emaitzak 3x3ko taula batean banatuta, zutabe bakoitzak





5.1 Irudia: Heatmap grafikoa, parametro doiketako emaitzak bistartzeko.

populazioaren tamaina adierazten du, lerro bakoitzak soluzioaren dimentsioa (kontsigna abiaduren hurbilketan soilik erabiliko dena), eta kutxa bakoitzean beste 3x3ko taula bat daukagu, non zutabeek gurutzaketa konstantearen balioa adierazten duten eta lerroek eskala konstantea. Gainera, kutxa txiki bakoitzaren barruan dagoen balioak parametro konbinaketa horretan egindako proba guztien helburu balioaren batz bestekoa adierazten du, kolore batez lagunduta, maximo eta minimo totalaren arteko gradientekoa.

Horrela, irudiko emaitzei erreparatuz gero, hainbat ondorio atera daitezke. Alde batetik, soluzioen dimentsioei dagokienez, argi ikusten da zenbat eta dimentsio handiagoa, helburu balioak orokorrean txikiagoak direla. Gainera, populazio tamainan desberdintasun handirik ez dagoen arren, zenbat eta populazio tamaina handiagoa, emaitzak hobekak izan ohi dira. Bestalde, bi konstanteek (gurutzaketa eta eskala konstanteak) antzeko joera erakusten dute, izan ere, populazio tamaina eta dimentsioen konbinazio guztietan, bi konstanteen balio maximoekin helburu balio handienak lortzen dira. Eskala konstantean zentratuz, balio oso txikiekin batzuetan helburu balioa handitu egiten da, baina ez da desberdintasun handirik antzematen orokorrean 0.2 eta 0.5 balioekin lortutako emaitzetan. Azkenik, gurutzaketa konstantean ere antzeko joera irudikatzen da, eta emaitzarik egokienak 0.2 eta 0.5 balioekin lortzen dira.

Beraz, amaitzeko, heatmap irudian lortu den baliorik baxuena lortzeko behar izan diren parametro balioak erabiliko ditugu, zehazki:

- Populazio tamaina,  $p = 100$
- Bektore dimentsioa,  $m = 8$

## 5. ESPERIMENTAZIOAREN PRESTAKETA

---

- Eskala konstantea,  $f = 0.5$
- Gurutzaketa konstantea,  $cr = 0.2$

## Esperimentazioaren emaitzak

Atal honetan esperimentazioa diseinatu eta burutuko da, eta horretarako, galdera batzuk planteatuko dira. Galdera horiek oinarritzat hartuz, esperimentazio diseinu desberdinak egingo dira eta galdera horiei erantzunak bilatzeko saiakera egingo da.

Bi galdera planteatu dira:

- Algoritmoek sortzen al dituzte bideragarriak, errealistak eta gidagarriak diren profilak?
- Algoritmoek sortzen dituzten profilen kalitatea ona al da? Hau da, energia kontsumo baxuko profilak lortzen al dira?

Galdera hauek erantzuteko hurbilketa bakoitza bakarka aztertuko da eta aipatu diren parametro balioak erabiliz bi hurbilketen algoritmoak exekutatu dira instantzia batzuetan. Ondoren, abiadura eta azelerazio profilak erakutsi eta konparatuko dira, eta murrizketa guztiak betetzen diren baieztatuko da. Gainera, lortutako energia kontsumoa orain arteko balioekin konparatuko da eta beharrezko denbora eta kontsumoaren arteko azterketa bat egingo da.

### 6.1 Azelerazioen hurbilketa

Azpiatal honetan lehen hurbilketari dagozkion esperimentuak egingo dira, batez ere, sortzen diren profilak bideragarriak diren ala ez ikusteko. Horretaz gain, instantzia bakoitzarekin hainbat exekuzio burutuko dira, algoritmoak konstantzia mantentzen duen ala ez ikusteko. 6.1 taulan adierazten dira egin diren proba eta lortutako emaitzak. Kasu honetan, ez da posible izan murrizketak betetzen dituen profilik lortzea, eta beraz, taulan agertzen diren emaitzak ez dira baliozko profilei dagozkienak, jarraian azalduko diren arrazoiengatik.

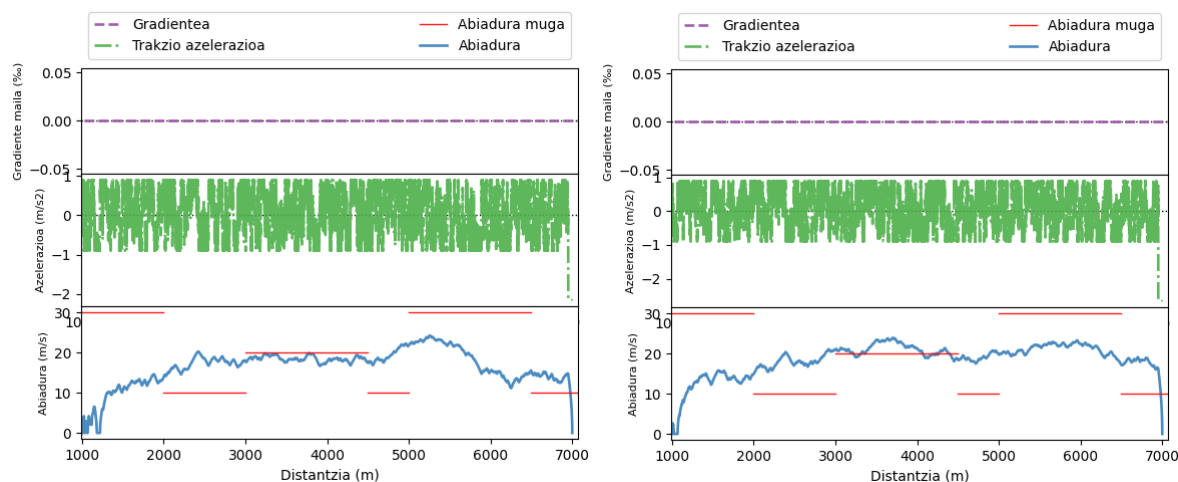
Taulan ikusten den moduan, bi instantzien arteko denbora desberdintasunak handiak dira, batean lortzen baita denboran iristea, eta bestean askoz denbora gehiago behar dute. Hala ere, abiadura eta azelerazio profilen irudiak aztertu ezkerre, 8 eta 9. instantziekin lortutako 6.1 eta 6.2 irudiak esaterako, garbi adierazten da zentzurik gabeko profilak sortzen direla, batez ere azelerazio aldaketa handiak sortzen direlako. Horren ondorioz, abiadura

## 6. ESPERIMENTAZIOAREN EMAITZAK

**6.1 Taula:** Azelerazioen hurbilketa erabiliz lortutako emaitzak.

Instantzia	Exekuzioa	Kontsumoa	Denbora originalarekiko alde
8	1	49.91kWh	-12.52s
8	2	52.53kWh	-103.52s
8	3	58.50kWh	-17.58s
9	1	50.74kWh	+1196.72s
9	2	49.58kWh	+1303.54s
9	3	52.00kWh	+1075.54s

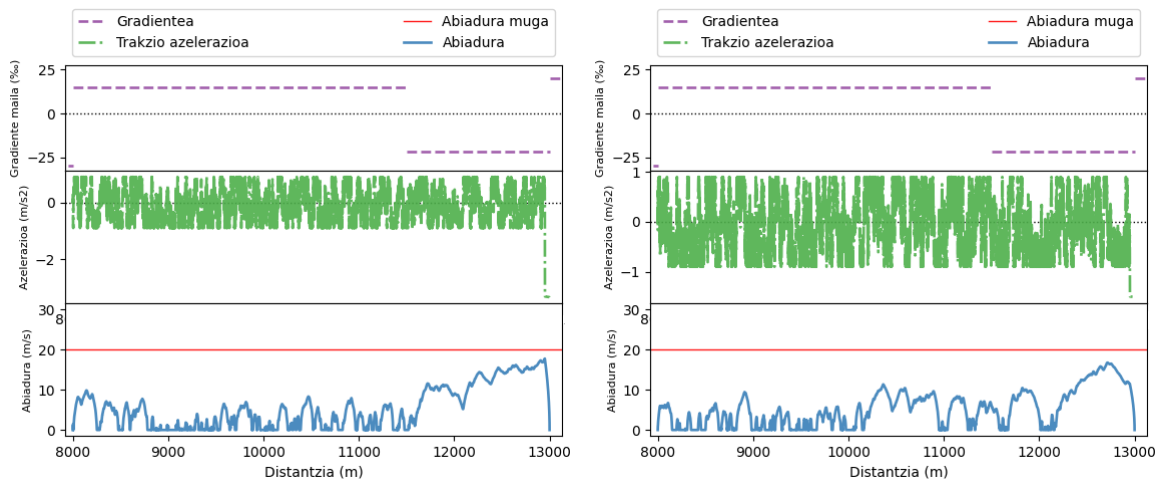
ere aldakorra da eta eta puntu batzuetan (batez ere hasieran, ondoren gradiente negatiboa baitago) abiaduraren balioa 0ra jaisten eta mantentzen da. Horrek adierazten du trenaren puntu horretan ez litzatekeela mugituko, eta horren ondorio nagusia da trenaren ez dela sekzioaren amaierara iritsiko. Gainera, abiadura mugak betetzeko zuzeneko mekanismoak ez dagoenez inplementatuta, ez dago profirik hau errespetatzen duenik, eta amaierara arte abiadura balio handiak lortzen dira, balaztatzeke ezinezkoak diren azelerazio balio negatiboak behar direlarik.



**6.1 Irudia:** 8. instantziaren abiadura eta azelerazio profirik, 2. exekuzio.

Ondorioz, adierazi genezake printzipioz hurbilketa honen bitartez profirik bideragarriak sortzea ez dela posible. Arrazoi nagusia azelerazio aldaketa handiak izan daitezke, izan ere, denboran erlazioa duen bektore kate bat osatzen da soluzio bakoitzean, ondoren beste aldagai guztietan (abiadura, indarrak, denbora, ...) eragin handia duena, eta inplementatutako algoritmoa ez da gai kate hori jarraitzeko. Gainera, ehundaka edo milaka dimentsiotako soluzioak direnez, hurbilketa honen konplexutasuna asko handitzen da, eta Differential Evolution moduko algoritmo azkarrak eta eraginkorrak erabili arren ez da konbergentziarik lortzen.

Beraz, frogatu da hurbilketa hau problema adierazteko ez dela batere efizientea, eta horregatik, hurbilketa hau baztertua izango da eta ez da gehiago kontuan hartuko.



6.2 Irudia: 9. instantziaren abiadura eta azelerazio profilak, 2 exekuzio.

## 6.2 Kontsigna abiaduren hurbilketa

Bigarren hurbilketaren kasuan sortzen diren emaitza guztiek hainbat murrizketa aurrez betetzen dituzte, izan ere, profila sortzeko algoritmoak muga batzuk errespetatzen ditu, abiadura mugak, trakzio/balazta ereduaren mugak eta konfort mugak, zehazki. Gainera, egin diren probek frogatu dute beti lortzen dela profil bideragarri bat, eta kontsumo baliok txikiagoak direla. Datozen lerrotan emaitzen hainbat atal deskribatuko dira, hala nola, lortu diren emaitzen abiadura eta azelerazio profilak, hauek profil "original-ekin dituzten desberdintasunak, emaitzen eta originalaren denbora-kontsumo grafikoak, eta algoritmoaren konbergentzia kurbak.

Azken azterketa hauek deigarrienak iruditu diren instantzien gainean egingo dira, dokumentua asko luzatze ez aldera. Hala ere, emaitza guztiak eta hauen grafikoak gehituko dira A eranskinean. Laburbilduz, esan daiteke hurbilketa honen bitartez emaitza bideragarriak lortzen direla beti. Emaitzen arteko aldeari dagokionez, berriz, kasurik gehienetan exekuzio desberdinen artean aldeak daude, baina alde horiek txikiak dira denborari dagokionez, eta are txikiagoak kontsumoari dagokionez. Honen arrazoia, eszenarioaren arabera gidatze estrategia desberdinak egon daitezkeela da, nahiz eta ondoren kontsumoa antzekoa den.

Hasteko, 6.2 taulan, deskribatu diren hainbat instantzien emaitzak adierazi dira labur-labur, bakoitzaren kontsumoa eta denbora originalarekiko aldea adieraziz.

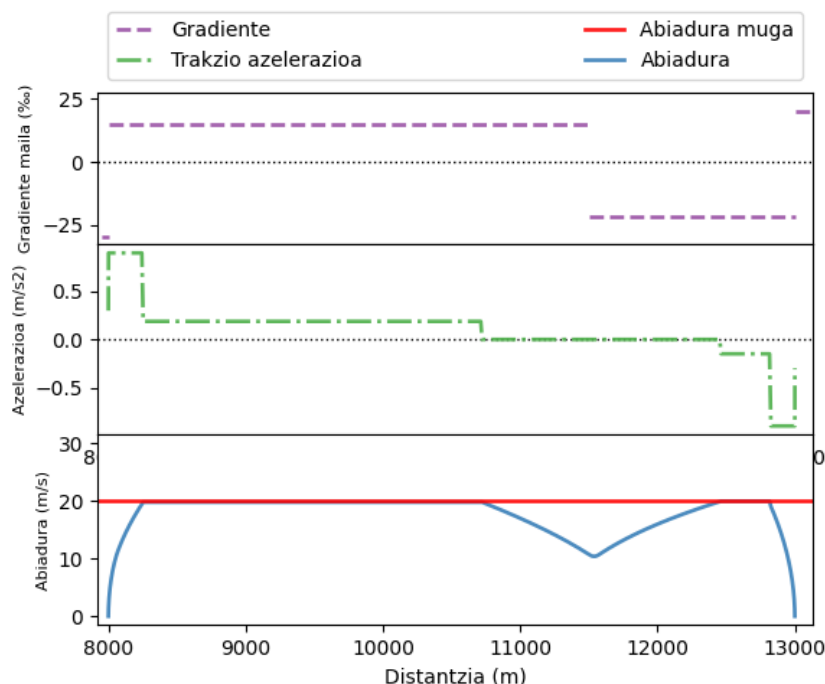
6.3 irudi honetan ikusi daiteke adibidez 6.2 taulako 9. instantziaren 1. exekuzioaren emaitza. Bertan, trenak izango duen abiadura teorikoa ikusi dezakegu lerro jarrai lodienaren bidez (baita muga zein den ere), eta trenaren azelerazioa lerro eten puntuz. Orokorrean, azelerazioen hurbilketako emaitzekin konparatu ezker, garbi ikusten da bigarren hurbilketa honekin lortutako emaitzak hobekak direla, batez ere, abiadura eta azelerazio aldaketa handirik ez dagoelako. Horretaz gain, trenak beti dauka abiadura positiboa (hasierako eta amaierako puntuetan ezik), eta abiadura muga guztiak nahiz kontsigna abiadura guztiak errespetatzeko kurba garbiagoak sortzen dira.

Bestetik, emaitzen itxurari dagokionez, hau da, profilen gidagarritasun eta jokaerari dagokionez, esan behar da aurreikuspenak gaintu direla. Beti soluzio bideragarriak lortzeaz gain, aurkezten diren soluzioek logika jarraitzen dute eta gradienteak aprobetxatzeko

## 6. ESPERIMENTAZIOAREN EMAITZAK

**6.2 Taula:** Kontsigna abiaduren hurbilketa erabiliz lortutako emaitza batzuk.

Instantzia	Exekuzioa	Kontsumoa	Denbora origina-larekiko aldea	Instantzia	Exekuzioa	Kontsumoa	Denbora origina-larekiko aldea
1	1	6.55kWh	-0.5s	8	1	16.57kWh	-3.5s
1	2	6.78kWh	-1.5s	8	2	16.47kWh	-1.0s
1	3	6.55kWh	-0.5s	8	3	15.90kWh	0.0s
2	1	11.40kWh	0.0s	9	1	31.06kWh	0.0s
2	2	11.40kWh	0.0s	9	2	31.02kWh	0.0s
2	3	11.40kWh	0.0s	9	3	31.03kWh	-0.5s
3	1	5.35kWh	-3.0s	10	1	37.64kWh	0.0s
3	2	5.35kWh	-3.0s	10	2	44.30kWh	0.0s
3	3	5.34kWh	-0.5s	10	3	36.83kWh	0.0s
6	1	12.47kWh	0.0s	11	1	10.60kWh	-0.2s
6	2	12.82kWh	-3.5s	11	2	10.96kWh	-0.3s
6	3	12.53kWh	-2.0s	11	3	10.68kWh	-0.0s
7	1	49.76kWh	0.0s	12	1	51.00kWh	-14.0s
7	2	46.03kWh	0.0s	12	2	48.92kWh	-7.0s
7	3	46.03kWh	0.0s	12	3	48.38kWh	-2.5s

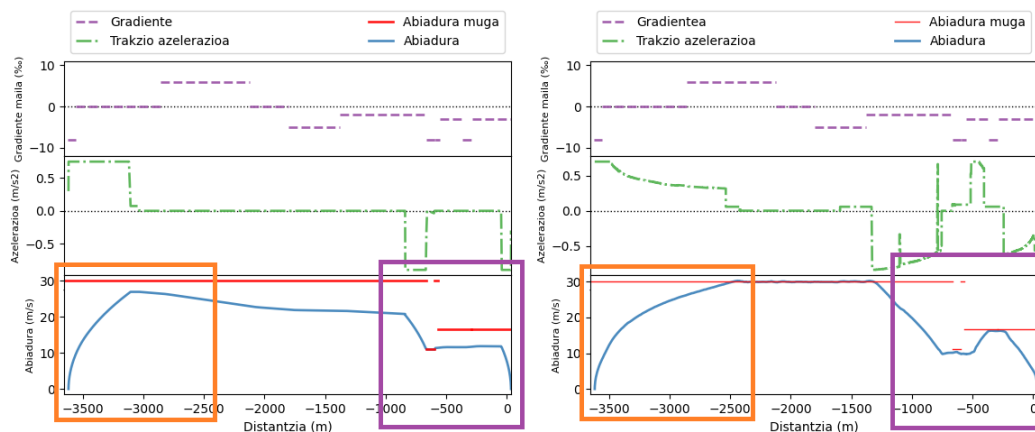


**6.3 Irudia:** 9. instantziaren abiadura eta azelerazio profilak.

joera dutela sumatzen da. Hau garbi ikusten da aurkeztutako 6.3 irudian. Bertan, gradiente positiboa dago 11500m-rarte, eta ondoren negatiboa amaierara arte, eta algoritmoaren proposamena begiratu ezkerreko ikusten da tarte horretan gradiente positiboa aprobetxatzen duela trenea balaztatzeko, eta ondoren negatiboa erabiltzen duela berriz ere abiadura hartzeko. Noski, beti ezin da estrategia hau erabili, batez ere gradienteak aldakorragoak izan ohi

direlako eta bestetik denboran iristea beharrezkoa denez posible delako ezin balaztatzea ibilbidean zehar.

Profilen itxurarekin jarraituz, lortutako emaitzak oinarritzat hartu diren profil originalekin konparatu ditzakegu. Adibide moduan 5. instantzia erabiliko dugu, estrategia desberdinen jokaera garbi ikusten delako, eta horretarako 6.4 irudia baliatuko da. Aipatu behar da "profil originala" deritzoguna benetako probetako *logetatik* hartutako informazioetik sortu dela, eta trenaren abiadura eta azelerazio balio errealak deskribatzen dituela, eta ohikoa den moduan, teoriatik errealtatera desberdintasunak egon daitezke.



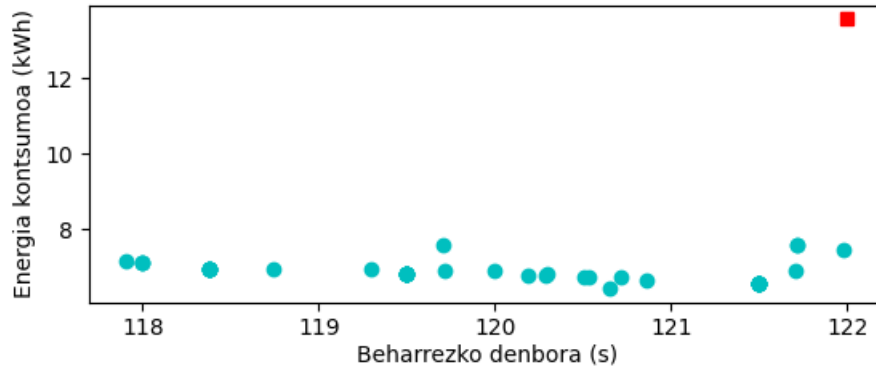
6.4 Irudia: 5. instantziarekin lortutako profila (ezkerra) eta profil "originala"(eskuina)

Hasteko, ezkerreko laukizuzenean tren martxan hasten da eta helburu abiadura bat arte azeleratzen du. Lehen irudian (algoritmoak sortutakoa) ez du abiadura mugaraino azeleratzen, baxuago gelditzen da, baina hala egiten du profil originalean. Gainera, behin abiadura puntu horretara iritsi ondoren, *coastinga* aplikatu daitezke ikusten da, gradientek ahalbidetzen dutelako, eta ez dutelako tren guztiz gelditzen. Horregatik, algoritmoak sortutako profilean hurrengo abiadura muga aldaketara arte *coastinga* aplikatzen du, eta bitartean profil originalak abiadura maximoa mantentzen du. Amaierako zatian (eskuineko laukizuzena), 10m/s-ko abiadura muga pasa ondoren, profil originalak berriz abiadura maximorarte azeleratzen du, eta algoritmoak sortutakoa, berriz, tarteko abiadura batean mantentzen da.

Beraz, aurretik aipatu diren hainbat kontzeptu hemen aplikatzen direla ikusten da, eta energia kontsumoan eragin handia izan dezake, izan ere, abiadura mugaraino ez azeleratzeak trakzioa aurrezteko dakar, eta ondoren egiten diren *coastingeko* 2km-etan trenak ez du kontsumorik. Amaitzeko, kontsumoari erreparatuz, profil originalak 27.43kWh-ko kontsumo teorikoa dauka, eta emaitza moduan lortu den profilak 16.65kWh-koa.

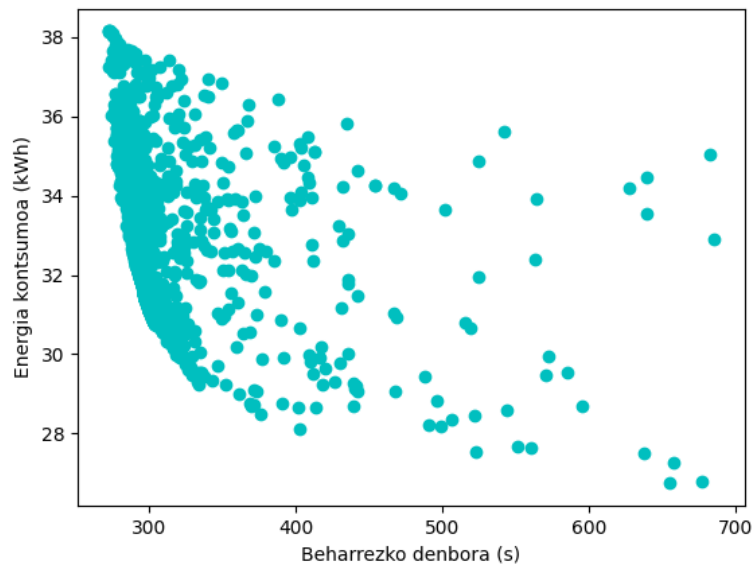
Bestalde, ikusita kontsigna abiaduren estrategiaren bitartez lortzen diren profilak bidegarriak eta egokiak direla, orain arte enpresan erabilitako profilen kontsumoekin konparaketak egingo dira. Adibide moduan, 1. instantzia erabiliko da eta denbora-kontsumo grafiko bidez erakutsiko dira emaitzak. 6.5 irudian ikusi daitezke egin diren 50 exekuzioen emaitzak puntu urdinez adierazita, eta lauki gorriaz erreferentziatzen hartu den profil originalekin lortutako emaitza. Lehen begirada batean garbi ikusten da lortu diren profil guztietan kontsumoari dagokionez emaitza hobea dela, baita denbora gutxiagoko profiletan ere. Gainera, denbora muga originalaren berdina jarri denez (122 segundo), lortu diren

profil guztiak denbora hori baino txikiagokoak dira.



**6.5 Irudia:** 1. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa

Kontsumoarekin jarraituz, aipatu beharra dago sekzioa burutzeko denbora mugak ondorio zuzena daukala energia kontsumoan, eta segundo guztiak aprobetxatu daitezkeela kontsumoa minimizatzeko. Horrela, lortzen diren profil posible guztiak denbora-kontsumo grafiko batean irudikatuko bagenitu, pareto kurba bat lortu datekeela ikusten da. 6.6 irudian esaterako, 9. instantziarekin egindako exekuzio batean sortzen diren profil guztiak adierazi dira, eta aipatu dena betetzen dela argi gelditzen da. Orokorrean, zenbat eta denbora gehiagoko profilak sortu, orduan eta kontsumo baxuagoa izango dute, eta alderantziz. Horrela, pareto kurba bat adierazi genezake eta baliagarria izango litzateke komeni diren soluzioak identifikatzeko, denbora ere minimizatuko bagenu.



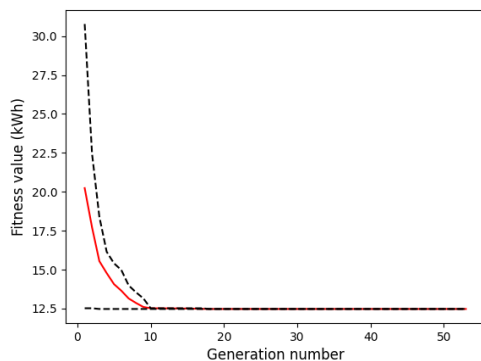
**6.6 Irudia:** 9. instantzian lortutako profil guztien denbora-kontsumo grafikoa.

Algoritmoaren portaerari dagokionez, konbergentzia kurbak osatu dira belaunaldi bakoitzean lortzen den populazioko soluzio bideragarrien helburu balio minimoa, maximoa

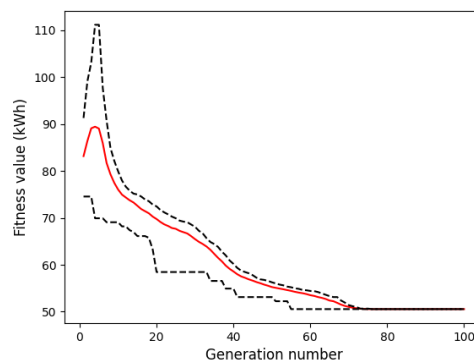


eta bataz bestekoarekin. Honela, belaunaldiz belaunaldi algoritmoak jarraitzen duen eboluzioa ikusi daiteke, eta erabaki batzuk hartzeko ebidentziak eman ditzake, hala nola, emaitza hobekak lortzeko exekuzioarekin jarraitzea edo alferrikako belaunaldien exekuzioak ekiditea. Adibide moduan aurkezten dira 6.7 irudiak, 6 eta 12. instantziei dagokien konbergentzia kurbak, hurrenez hurren. Irudi hauetan lerro gorriak belaunaldi bakoitzeko populazioko helburu balioen bataz bestekoa adierazten du, eta inguruko lerro eten beltzen bitartez balio maximoa eta minimoa adierazten dira. 6. instantziaren konbergentzia kurbari dagokionez, hasieratik emaitza onak lortzeaz gain, oso belaunaldi gutxitan algoritmoa konbergitzen dela ikusi daiteke, eta beraz, egiten dituen gainontzeko iterazioak sobran egongo lirakekeela. 12. instantzian berriz, belaunaldiak aurrera joan ahala, algoritmoak emaitza hobekak lortzen ditu eta askoz ere belaunaldi gehiago behar ditu konbergitu aurretik.

Hala ere, instantzia batzuen konbergentzia kurbetan algoritmoaren hasierako iterazioetan kurbak gorako joera hartzen duela ikusten da, 12. instantzian esaterako. Hasieran joera hau arraroa izan badaiteke ere, jakin behar da belaunaldi bakoitzeko bideragarriak diren soluzioen helburu balioak soilik hartzen direla kontuan. Horregatik, lehen belaunaldietan, bideragarriak diren soluzioak gutxi izan daitezke, eta belaunaldiak aurrera joan ahala, soluzio bideragarri gehiago sortzen dira. Beraz, orain bideragarriak gehiago direnez, emaitzak era askotarikoak dira, batzuk orain artekoak baino okerragoak ere bai, eta populazioan sartzen dira bideragarriak ez diren soluzioak ordezkatzuz.



(a) 6. instantzia



(b) 12. instantzia

6.7 Irudia: 6 eta 12. instantziekin lortutako konbergentzia kurbak



## Ondorioak eta etorkizunerako lanak

Proiektu honen helburu nagusia trakzio azelerazio profilen optimizazioa izan da, energia kontsumoa minimizatzeko helburuarekin. Horretaz gain, gaur egun erabiltzen den sistemak sortzen dituen profilen hainbat ezaugarri hobetu nahi izan dira, hala nola, gradientek aprobetxatzea edo beti abiadura mugan ez gidatzea. Horretarako, arazo nagusia profilak sortzeko metodoak gauzatzea izan da, eta bi hurbilketa osatu dira, bakoitza ikuspegi desberdin batetik. Lehen hurbilketaren kasuan (azelerazioen hurbilketa deitua), sekzio osoko puntu bakoitzari dagozkion trakzio azelerazio balioak zuzenean optimizatzen dira, ondoren beste profil guztiak kalkulaturik. Bigarren hurbilketaren kasuan (kontsigna abiaduren hurbilketa), berriz, abiadura jarraibide batzuk optimizatzen dira, eta hortik abiatuta profil guztiak osatzen dira *balaztarik gabeko abiaduraren erregulazioa* estrategia jarraituz.

Hala ere, bi hurbilketekin emaitza desberdinak lortu dira. Batetik, azelerazioen hurbilketa aplikatuta ez da lortu bideragarria den emaitzarik, sortu diren profil guztietan murrizketaren bat betetzen ez delako, batez ere denbora eta abiadura balioei dagozkienak. Gainera, azelerazio balioen aldaketak oso handiak dira puntuen artean eta horrek etengabeko abiadura aldaketak dakartza. Horregatik, hurbilketa hau baztertzea eta azterketa sakonagorik ez egitea erabaki da. Bestetik, kontsigna abiaduren hurbilketarekin ez dira zuzenean trakzio azelerazio profilak definitzen, eta horren ordez estrategia bat jarraitzen da sortzen diren emaitzak bideragarriak izateko. Egin diren proben arabera, beti lortu izan da soluzio bideragarriaren bat, strategiaren inplementazioaren ondorioz bete beharreko 5 murrizketetatik 4 beti betetzen baitira, denak beharrezko denbora maximoa izan ezik.

Dena den, aipatu den moduan, adierazi nahi da algoritmoaren aukeraketak ez duela garrantzi handirik optimizazio problema honen emaitzetan eta horren ordez formalizazioak baldintzatu duela emaitzen kalitatea nolakoa den. Horregatik, ez da horrenbeste azpimarratzen Differential Evolution algoritmoak problemaren soluzioetan izan dezakeen eragina. Hala ere, algoritmoaren aukeraketarako arrazoirik garrantzitsuena sinplea eta azkarra dela izan da, exekuzio denborak etorkizunean eginkizun garrantzitsua izango duelako (benetako tren batean enbarkatzeko). Horretan ere bi hurbilketek emaitza desberdina ematen dute, eta lehen hurbilketak orokorrean bigarrenak baino 5 aldiz denbora gehiago behar

izaten du algoritmoaren exekuzio bakar bat burutzeko, nahiz eta bien denborak gaur egun gehiegizkoak diren.

Emaitzei dagokienez, ondorioztatu da emaitza onak lortzen direla eta kasu guztietan, kontsumo aldetik, datu originalekin konparatuz, kontsumo baxuagoa duten profilak lortu dira. Gainera, profilen "forma"edo gidagarritasuna ere aztertu da, eta ondorioztatu da algoritmoak sortzen dituen abiadura eta azelerazio profilak hobeak direla, batez ere, energia aurrezteko gradienteak aprobetxatzen direlako, eta beharrezkoa ez denean abiadura maximoa azeleratzen ez delako. Sekzio bat burutzeko beharrezko denborak asko baldintzatzen du emaitzaren jokaera, eta Best Running Time baino zenbat eta denbora gehiago izan, sortzen diren emaitzen kontsumoak orduan eta gehiago jaisten dira, eta profil desberdin anitzagoak lortzen dira. Horretaz gain, profil onenen beharrezko denbora beti denbora maximotik oso gertu dago, eta horrek ere frogatzen du bi kontzeptu hauen arteko erlazioa oso handia dela.

Hurbilketen diseinuaz gain, beharrezkoa da aipatzea Differential Evolution algoritmoak izan duen betebeharra problema honetan, nahiz eta ez den garrantzitsua izan. Deskribatu diren hamabi instantziak desberdinak dira beraien artean, bai distantziari nahiz konplexutasunari dagokionez, eta azpimarratu nahi da algoritmoak instantzia bakoitzaren ezaugarrien arabera desberdin jokatzeko duela. Izan ere, instantzia sinple eta motzekin belaualdi gutxiren buruan amaitzen da exekuzioa, baina sekzioak luzeagoak eta konplexuagoak baldin badira (gradiente aldaketa handiak, abiadura muga aldaketa asko, ...), algoritmoak belaualdi gehiago behar ditu konbergitzeko.

Bestalde, etorkizuneko lanei dagokienez, enpresak dituen beharretara hurbiltzeko lan egingo da, eta hasiera batean alde batera utziko dira optimizazio problemaren eta algoritmoaren formalizazioari dagozkien hobekuntzak. Sarreran aipatu den moduan, proiektu honen enpresako helburua benetako tren batean inplementatzea eta erabiltzea da, baina prozesu honek zailtasun eta muga asko dituenez, lana horretan zentratuko da. Zehatzagoak izanda, lanik garrantzitsua proiektua treneratzeko aukera ikertzea da, eta posible bada exekuzio denbora eta errendimendu probak burutzeko. Horretarako, inplementazioaren exekuzio denborak eta memoria erabilerak jaitsi beharko dira, trenetan ezaugarri mugatuko makinak erabiltzen baitira. Beraz, hasteko, inplementazio guztia C++ programazio lengoian idatzi beharko da, memoria aurrezte eta optimizazio teknikak erabiliz. Horretaz gain, balaztarik gabeko abiaduraren erregulazio estrategiaren inplementazioa optimizatu daiteke, sekzio osoa adierazteko profil-puntu gutxiago erabiliz, eta ondorioz, exekuzio denbora txikiagotuz. Gainera, egindako kalkuluetan zentratuz, beharrezkoa izango da zehaztasun erroreak zuzentzea errealistagoak diren profilak sortzeko, azelerazio aldaketa leunagoak eta jerk mugak aplikatzea, edo trenaren masa aldagarria kontuan hartzea, esaterako.

Amaitzeko, optimizazio problemari dagokionez, ikusita beharrezko denbora eta kontsumoa oso erlazionatuta daudela, 6.6 irudian ikusten den moduan, problemaren ikuspegia aldatu daiteke eta helburu gisa kontsumoaz gain denbora duen problema bat formalizatu daiteke.

## Optimizazio problemaren formalizazioa

Atal honetan proposatutako bi optimizazio problemen formalizazioa adieraziko da zehaztasun osoz. Lehen hurbilketari dagokionez,  $a^{tr} \in \Omega$  soluzioko elementu bakoitza (trakzio azelerazio balioa), eta 3.19 eta 3.24 ekuazioen bidez kalkulaturako denbora eta abiadurarekin puntu guztietako energia kontsumoa batu behar da. Gainera, 3.4.2 atalean agertzen diren murrizketa guztiak bete behar dira.

$$\arg \min_{a^{tr} \in \Omega} \sum_{i=1}^n P_{katenaria}(a_i^{tr}, v_i) \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (\text{A.1})$$

s.t

$$0 < v_i \leq V_{max}(d_i) \quad i = 1, \dots, n-1, v \in \Delta, d \in \Lambda, \quad (\text{A.2})$$

$$v_n = 0, \quad v \in \Delta, \quad (\text{A.3})$$

$$t_n - t_0 \leq T, \quad t \in \Upsilon, \quad (\text{A.4})$$

$$\alpha_1 \leq a_i^{to} \leq \alpha_2, \quad i = 1, \dots, n, a^{to} \in \Omega, \quad (\text{A.5})$$

$$F_i^{to} \leq W_t(v_i) \quad i = 1, \dots, n, v \in \Delta, a^{to} > 0, \quad (\text{A.6})$$

$$F_i^{to} \leq W_b(v_i) \quad i = 1, \dots, n, v \in \Delta, a^{to} < 0 \quad (\text{A.7})$$

3.18 ekuazioan kalkulatu den  $d$  distantzia bektorea eta  $a^{tr}$  soluzio batekin abiatuz, gainontzeko profila kalkulatu behar dira. Zehazki, 3.19 ekuazioarekin  $t_i$  kalkulatu da (posizio puntu bakoitzeko denbora) eta 3.24 ekuazioarekin  $v_i$  (trenaren puntu bakoitzeko abiadura). Ondoren, murrizketetan abiadura puntu bakoitzak mugen ( $V_{max}(d_i)$ ) azpitik egon behar du (A.2), azken abiadura balioak 0 izan behar du (A.3), denbora osoak maximoaren ( $T$ ) azpitik egon behar du (A.4), 3.23 ekuazioa erabiliz lortzen den azelerazio balio totalak konfort balio minimo ( $\alpha_1$ ) eta maximoak ( $\alpha_2$ ) errespetatu behar ditu (A.5) eta 3.25 ekuazioa erabiliz kalkulatu den puntu bakoitzeko egin beharreko indar totalak abiaduraren araberrako trakzio indar maximo ( $W_t(v_i)$ ) eta balazta indar maximoak ( $W_b(v_i)$ ) errespetatu behar ditu, azelerazio balioa positiboa (A.6) edo negatiboa (A.7) denean, hurrenez hurren.

Bigarren hurbilketan,  $y \in \Gamma$  soluzio batetik abiatuta, 3.5.2 ataleko azelerazio estrategia, aurredefinitutako denbora tartea eta 3.36 ekuazioetatik kalkulatutako abiadura balioaren bitartez puntu guztietako energia kontsumoa kalkulatu behar da. Aurreko hurbilketaren moduan, 3.4.2 atalean agertzen diren murrizketa guztiak bete behar dira.

$$\arg \min_{y \in \Gamma} \sum_{j=1}^z P_{katenaria}(a_j^{tr}, v_j) \cdot \Delta t \quad (\text{A.8})$$

s.t

$$0 < v_j \leq V_{max}(d_j) \quad j = 1, \dots, z-1, v \in \Delta, d \in \Lambda \quad (\text{A.9})$$

$$v_n = 0, \quad v \in \Delta, \quad (\text{A.10})$$

$$t_n - t_0 \leq T, \quad t \in \Upsilon, \quad (\text{A.11})$$

$$a_j^{to} \in [\alpha_1, \alpha_2], \quad j = 1, \dots, z, a^{to} \in \Omega, \quad (\text{A.12})$$

$$F_j^{to} \leq W_t(v_j) \quad j = 1, \dots, z, v \in \Delta, a_j^{to} > 0, \quad (\text{A.13})$$

$$F_j^{to} \leq W_b(v_j) \quad j = 1, \dots, z, v \in \Delta, a_j^{to} < 0 \quad (\text{A.14})$$

non  $y$  soluziotik abiatuta, 3.36 ekuazioekin puntu bakoitzeko denbora ( $t_j$ ), abiadura ( $v_j$ ) eta distantzia ( $d_j$ ) balioak kalkulatzen diren, eta trakzio azelerazioa ( $a_j^{tr}$ ) erabakitzeko 3.5.2 ataleko estrategia jarraitzen den. Ondoren, parametro horiek erabiliz helburu funtzioa eta murrizketak kalkulatzen dira, aurreko hurbilketan egindako pausu berdina jarraituz

## Instantzien deskribapena

Ondorengo tauletan dokumentuan erabili diren 12 instantziak deskribatzen dira. Instantziak ordenan daude azalduta, eta beren zenbakiaren arabera identifikatzen dira dokumentu guztian zehar.

### 1. Takanini - Te Mohia

Sekzio hau, gehiengo bezala, nahiko motza da, 1639m-koa, hain zuzen. Hala ere, 100 eta 110km/h arteko abiadura mugak daude, eta orografiari dagokionez, ia ibilbide osoak gradiente negatiboa dauka, nahiz eta balio txikikoak diren. Gainera, sekzio hau burutzeko 200s-ko tartea ematen da.

**B.1 Taula:** 1. instantziako (Takanini - Te Mohia) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	4	
$q$	4	
$l$	1639.9m	
$l_{stop}$	1589.9m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	122s	
$V_{max}$	(-7219, -6811, 29.1), ..., (-6420, -5106, 29.1)	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga). Adibidez, -7219m eta -6811m-en artean 29.1m/s-ko (105km/h) abiadura muga dago.
$G$	(-7526, -6811, -2), ..., (-5856, -4026, 10)	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradienteak). Kasu honetan, esaterako, -7526 eta -6811m-en artean ‰ - 2ko gradienteak dago.

### 2. Te Mohia - Manurewa

Sekzio hau aurrekoaren jarraipena da, eta Te Mohia eta Manurewa geltokien arteko ibilbidea deskribatzen du. Kasu honetan ere, sekzioa motza da, 1253m-koa, eta 95 eta 110km/h arteko abiadura mugak daude definituta. Amaitzeko, gradiente konstantea da ibilbide guztian zehar ‰ - 10ekoa, hain zuzen, eta ibilbidea burutzeko denbora maximoa 67 segundokoa izango da.

## B. INSTANTZIEN DESKRIBAPENA

**B.2 Taula:** 2. instantziako (Te Mohia - Manurewa) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	3	
$q$	1	
$l$	1253m	
$l_{stop}$	1213m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	96s	
$V_{max}$	(-6420, -5106, 29.1), ..., (-4208, -3929, 26.3)	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(-5856, -4026, 10)	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

### 3. Homai - Puhinui

Ibilbide berarekin jarraituz, aurrerago aurkitu daiteken Homai eta Puhinui geltokien artekoa definituko da. Sekzio honen luzera 3196.22m-koa da, 80 eta 110km/h-ko abiadura mugekin. Aldapa edo gradienteei dagokienez, ez da oso sekzio aldapatsua, eta balio txikiko gradiente positibo eta negatiboak txandakatzen dira. Amaitzeko, 233 segundo izango ditu trenak sekzioa amaitzeko.

**B.3 Taula:** 3. instantziako (Homai - Puhinui) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	8	
$q$	7	
$l$	3196.22m	
$l_{stop}$	3146.22m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	233s	
$V_{max}$	(-3929, -1085, 30), ..., (1364, 1543, 29.1)	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(-2056, -1506, -4), ..., (1089, 1744, 1)	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

### 4. Takanini - Newmarket

Sekzio luzeago bat lortzeko helburuz jarraian dauden hainbat geltoki batu dira eta ibilbide oso bat osatu da. Kasu honetan Takanini eta Newmarket geltokiak lotzen dituen sekzio bat definitu da, 23841m-koa, hain zuzen. Abiadura maximoak, 80 eta 110km/h artekoak dira, eta sekzioa luzeagoa denez, orografian aldaketa asko daude ibilbide osoan zehar. Kasu honetan denbora maximo zehatza zein den ezin izan da jakin, baina datuei begiratuta, 17 minutu eta 30 segundoko muga ipintzea erabaki da.



**B.4 Taula:** 4. instantziako (Takanini - Newmarket) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	28	
$q$	51	
$l$	23841m	
$l_{stop}$	23791m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	1050s	
$V_{max}$	(-7219, -6811, 29.1), ..., (16892, 17058, 22.2)	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(-7526, -6811, -2), ..., (16952, 17037, -2)	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

## 5. Takanini - Papakura

Kasu honetan 3651m-ko sekzio bat definitzen da, 213 segundotan burutu beharrekoa. Abiadura muga aldaketa desberdinak daude, 40 eta 110km/h tartean kokatzen direnak. Gainera, gradienteei dagokienez, gehienbat aldapa behera dagoela nabarmendu daiteke.

**B.5 Taula:** 5. instantziako (Takanini - Papakura) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	6	
$q$	11	
$l$	3651m	
$l_{stop}$	3611m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	213s	
$V_{max}$	(-4111, -3834, 23.6), ..., (-295, 155, 16.6)	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(-3834, -3559, -8), ..., (-284, 165, -3)	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

## 6. Homai - Te Mohia

Bi geltoki igarotzen dituen 3415m-ko sekzio hau 195 segundotan egin beharko da. Abiadura maximo nahiko konstanteak aurkitu daitezke zati honetan, 95 eta 110km/h artekoak. Orografiari dagokionez, orokorrean, malda positiboa da nagusi.

**B.6 Taula:** 6. instantziako (Homai - Te Mohia) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	3	
$q$	5	
$l$	3415m	
$l_{stop}$	3365m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	195s	
$V_{max}$	(-9439, -7223, 30), ..., (-6952, 4111, 30)	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(-8879, -7049, 10), ..., (-5379, -5079, -11)	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

## 7. Lugaritz - Errekalde BRT

Asmatua den lehen instantzia hau 6000m luze da, eta guztiz lau den ibilbidea dauka.

## B. INSTANTZIEN DESKRIBAPENA

Denborari dagokionez, abiadura maximoan joaten denean lortuko duen denbora zehatza ipini zaio, 380 segundo, Best Running Time (BRT) deitzen zaiona. Abiadura maximoak, berriz, 10 eta 30m/s artean aldatzen dira.

**B.7 Taula:** 7. instantziako (Lugaritz - Errekalde BRT) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	6	
$q$	1	
$l$	6000m	
$l_{stop}$	5950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	380s	
$V_{max}$	(0, 2000, 30), (6500, 7500, 10)	..., Abiadura mugen eredia (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(0, 18000, 0)	Gradiente eredia (posizio-tartea, gradientea).

### 8. Lugaritz - Errekalde BRT20

Instantzia hau aurrekoaren berdina da, baina denbora soberan eman nahi zaio energia aurreztu dezakeen ikusteko. Horregatik, BRT baino %20 denbora gehiago izango du, 455 segundo.

**B.8 Taula:** 8. instantziako (Lugaritz - Errekalde BRT20) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	6	
$q$	1	
$l$	6000m	
$l_{stop}$	5950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	455s	
$V_{max}$	(0, 2000, 30), (6500, 7500, 10)	..., Abiadura mugen eredia (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(0, 18000, 0)	Gradiente eredia (posizio-tartea, gradientea).

### 9. Zarautz - Zumaia BRT10

Instantzia honek 5000m-ko luzera dauka, eta abiadura muga konstantea 20m/s-an. Baina gradienteei dagokienez, hasieran gradiente positiboa dauka eta sekzioaren azken zatian gradientea negatiboa da. Horregatik, BRT baino %10 denbora gehiago jarriko zaio (283 segundo) eta ikusiko da ea gradiente negatibo hori aprobetxatzen duen profilik sortzen den.

**B.9 Taula:** 9. instantziako (Zarautz - Zumaia BRT10) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	1	
$q$	3	
$l$	5000m	
$l_{stop}$	4950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	283s	
$V_{max}$	(7500, 13500, 20)	Abiadura mugen eredia (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(2500, 8000, -30), (11500, 13000, -22)	..., Gradiente eredia (posizio-tartea, gradientea).

10. Zumaia - Deba BRT

Instantzia hau aurrekoaren antzekoa da, baina kasu honetan luzeagoa da (8000m).  
Gradienteak berdinak diren arren, abiadura muga aldaketa asko daude 10 eta 30m/s artean, eta denbora maximoa BRT izango da, 490 segundo.

**B.10 Taula:** 10. instantziako (Zumaia - Deba BRT) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	7	
$q$	2	
$l$	8000m	
$l_{stop}$	7950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	490s	
$V_{max}$	(0, 2000, 30), (7500, 13500, 20)    , ...	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(0, 2500, 20), (2500, 8000, -30)    , ...	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

11. Zumaia - Deba BRT10

Instantzia hau aurrekoaren berdina da baina BRT baino %10 denbora gehiagorekin (538 segundo).

**B.11 Taula:** 11. instantziako (Zumaia - Deba BRT10) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	7	
$q$	2	
$l$	8000m	
$l_{stop}$	7950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	538s	
$V_{max}$	(0, 2000, 30), (7500, 13500, 20)    , ...	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(0, 2500, 20), (2500, 8000, -30)    , ...	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

12. Donostia - Deba BRT10

Azken instantzia hau asmatu denetatik luzeena da, eta egoera ia guztiak hartzen ditu kontuan, izan ere, sortu den linea guztia igarotzen du. Luzera 18000m-koa da, gradiente aldakorra da puntu askotan, eta baita abiadura ere, 10 eta 30m/s artean. Amaitzeko, BRT baino %10 denbora gehiago emango zaio, 1013 segundo.

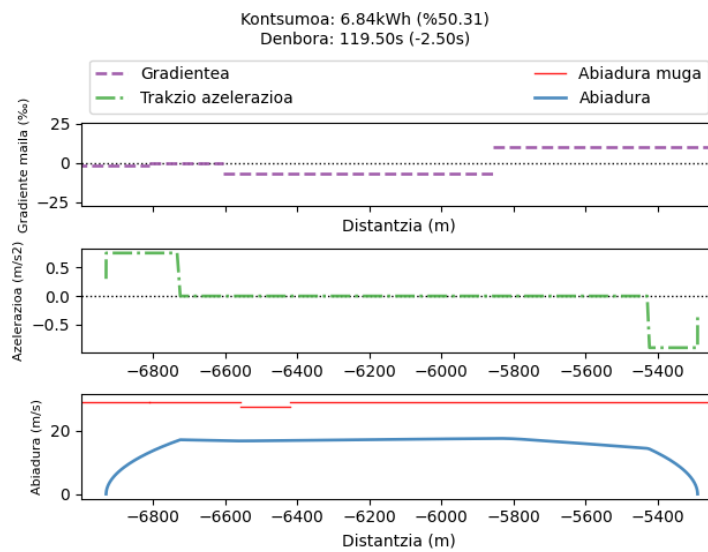
**B.12 Taula:** 12. instantziako (Donostia - Deba BRT10) parametroak.

Parametroa	Balioa	Oharrak
$s$	8	
$q$	10	
$l$	18000m	
$l_{stop}$	17950m	Azelerazioen hurbilketan soilik erabiliko da.
$T$	1013s	
$V_{max}$	(0, 2000, 30), (13500, 18000, 30)    , ...	Abiadura mugen eredua (posizio-tartea, abiadura muga).
$G$	(0, 2500, 20), (16000, 18000, -30)    , ...	Gradiente eredua (posizio-tartea, gradiente).

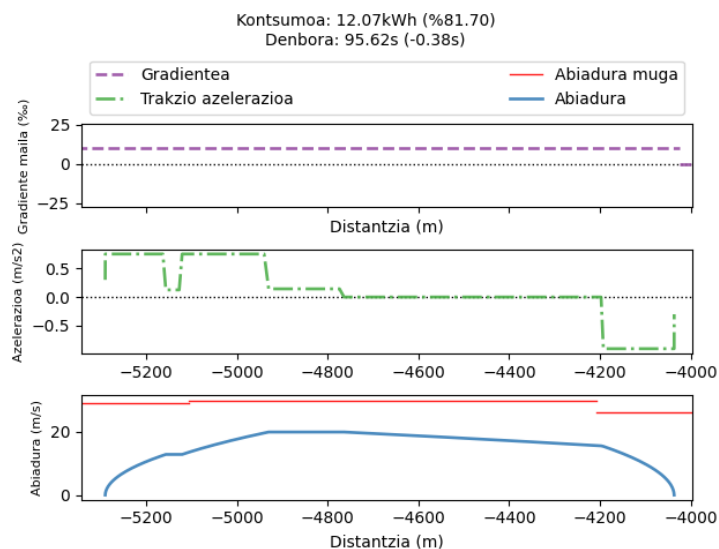


## Emaitzen laburpena

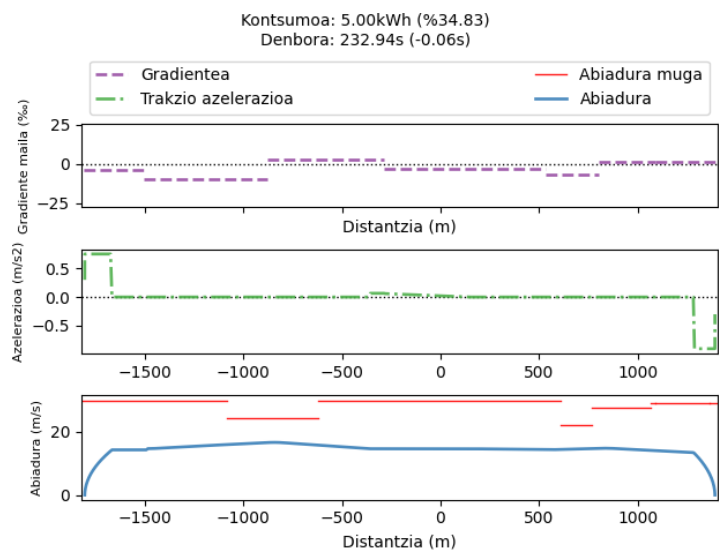
Atal honetan deskribatutako instantzia guztiekin lortu diren abiadura/trakzio profilak erakusten dira. Irudi bakoitzaren gainean emaitza bakoitzaren kontsumoa eta beharrezko denbora agertzen dira, eta parentesi artean kontsumo originalarekiko (baldin badago) zenbat aurreztu den ehunekotan eta denbora maximoarekiko dagoen aldea agertzen da.



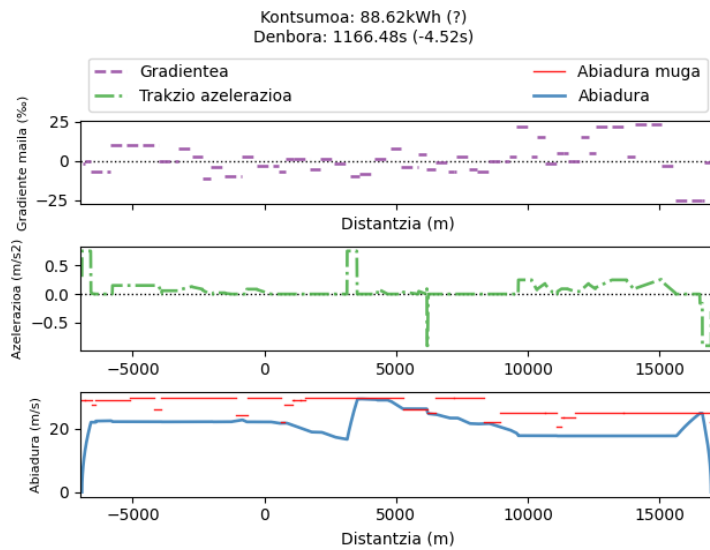
C.1 Irudia: 1. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



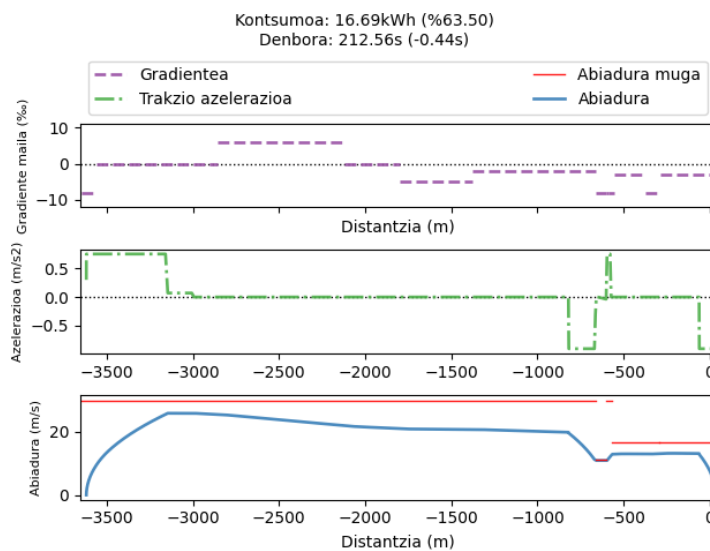
**C.2 Irudia:** 2. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



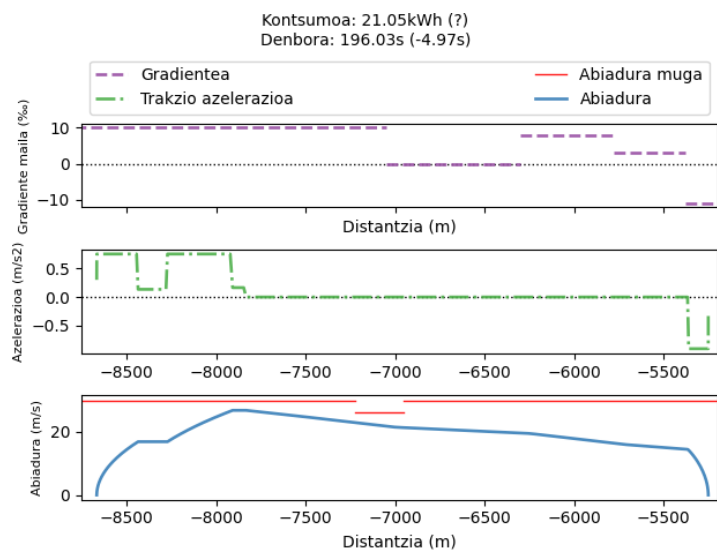
**C.3 Irudia:** 3. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



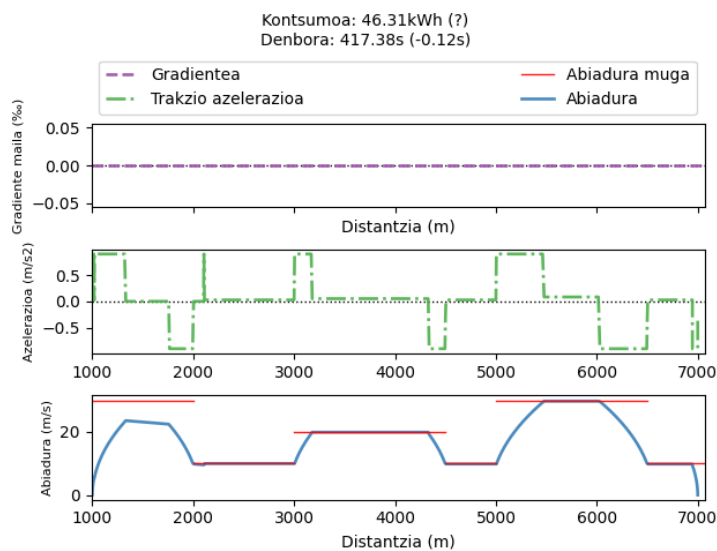
**C.4 Irudia:** 4. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



**C.5 Irudia:** 5. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa

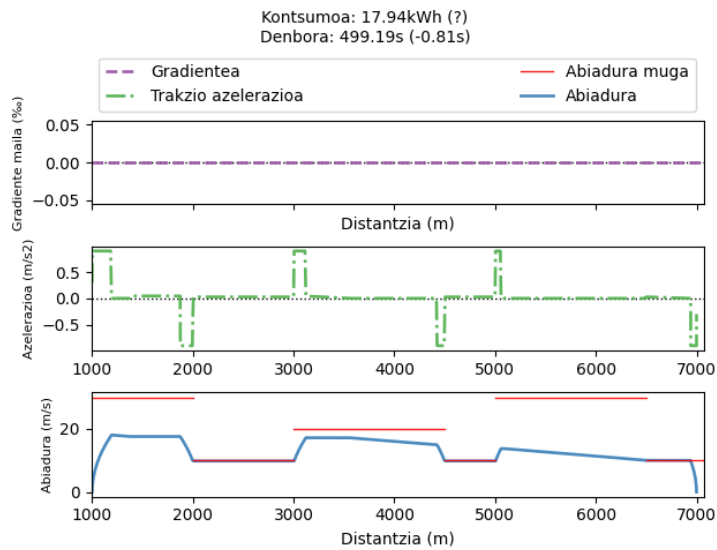


**C.6 Irudia:** 6. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa

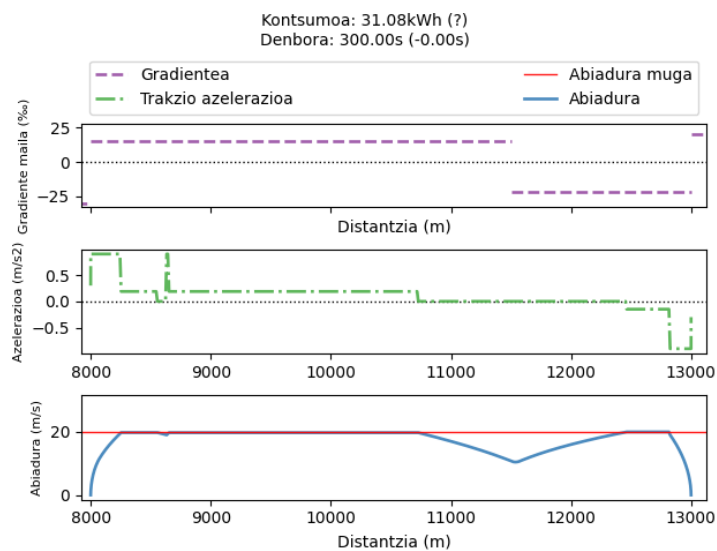


**C.7 Irudia:** 7. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa

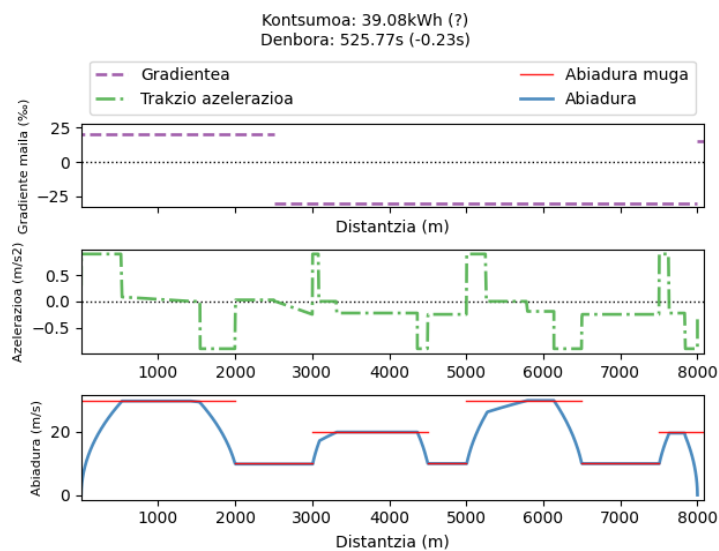




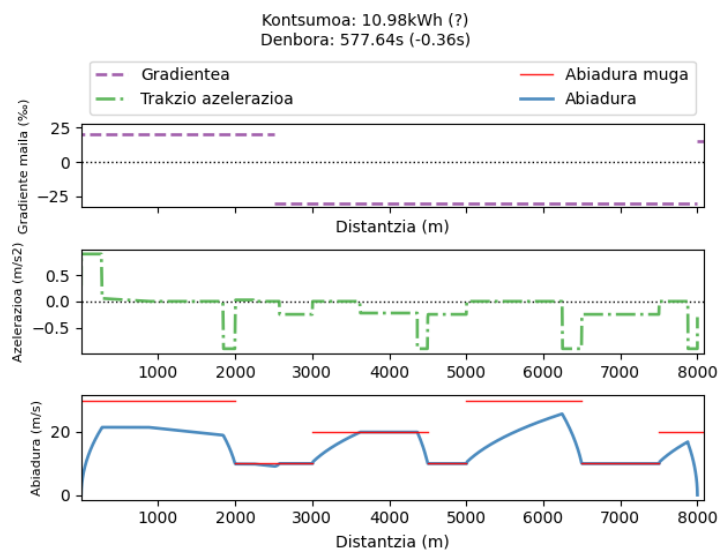
**C.8 Irudia:** 8. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



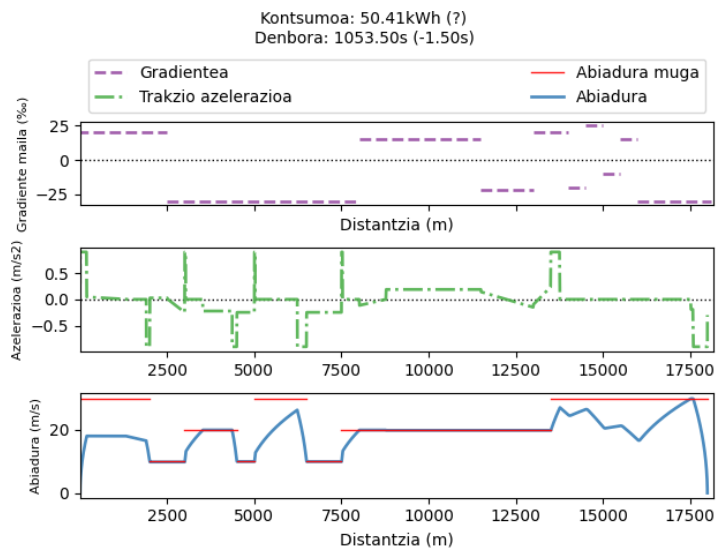
**C.9 Irudia:** 9. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



**C.10 Irudia:** 10. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



**C.11 Irudia:** 11. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



**C.12 Irudia:** 12. instantziaren denbora-kontsumo grafikoa



# Bibliografía

- [Bocharnikov et al., 2007] Bocharnikov, Y., Tobias, A., Roberts, C., Hillmansen, S., and Goodman, C. (2007). Optimal driving strategy for traction energy saving on dc suburban railways. *IET Electric Power Applications*, 1(5):675. Ikusi 9, 10 orrialdeak.
- [Clark, 2012] Clark, S. (2012). A history of railway signalling (from the bobby to the balise). In *IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012)*, page 6–25. IET. Ikusi 4 orrialdea.
- [Cucala et al., 2012] Cucala, A., Fernández, A., Sicre, C., and Domínguez, M. (2012). Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver’s behavioral response. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(8):1548–1557. Ikusi 7, 8 orrialdeak.
- [Dominguez et al., 2012] Dominguez, M., Fernandez-Cardador, A., Cucala, A. P., and Pecharroman, R. R. (2012). Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ato speed profiles. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(3):496–504. Ikusi 8, 9, 10, and 11 orrialdeak.
- [Domínguez et al., 2010] Domínguez, M., Fernández, A., Cucala, A. P., and Blanquer, J. (2010). Efficient design of automatic train operation speed profiles with on board energy storage devices. page 509–520. Ikusi v, 8, 10, and 11 orrialdeak.
- [Domínguez et al., 2011] Domínguez, M., Fernández, A., Cucala, A. P., and Lukaszewicz, P. (2011). Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(5):463–474. Ikusi 6, 7 orrialdeak.
- [Dong et al., 2010] Dong, H., Ning, B., Cai, B., and Hou, Z. (2010). Automatic train control system development and simulation for high-speed railways. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 10(2):6–18. Ikusi 4 orrialdea.
- [Fernandez et al., 2006] Fernandez, A., Cucala, A. P., Vitoriano, B., and de Cuadra, F. (2006). Predictive traffic regulation for metro loop lines based on quadratic programming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(2):79–89. Ikusi 7 orrialdea.
- [García-Álvarez et al., 2012] García-Álvarez, A., Perez-Martinez, P., and González-Franco, I. (2012). Energy consumption and carbon dioxide emissions in rail and road freight transport in spain: A case study of car carriers and bulk petrochemicals. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17. Ikusi 1 orrialdea.
- [Greenway and Sheldon, 1974] Greenway, J. and Sheldon, R. (1974). Automatic train control and communications for washington metro. *Communications Society*, 12(6):14–21. Ikusi 4 orrialdea.
- [Han et al., 1999] Han, S. H., Byen, Y. S., Baek, J. H., An, T. K., Lee, S. G., and Park, H. J. (1999). An optimal automatic train operation (ato) control using genetic algorithms (ga). In *Proceedings of IEEE. IEEE Region 10 Conference. TENCON 99. “Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure” (Cat. No.99CH37030)*, volume 1, page 360–362. IEEE. Ikusi 8, 10 orrialdeak.

- [Howlett et al., 2009] Howlett, P., Pudney, P., and Vu, X. (2009). Local energy minimization in optimal train control. *Automatica*, 45(11):2692–2698. Ikusi 7, 8 orrialdeak.
- [Huang et al., 2017] Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., and Cao, F. (2017). Joint train scheduling optimization with service quality and energy efficiency in urban rail transit networks. *Energy*, 138:1124–1147. Ikusi 7 orrialdea.
- [Khmelnitsky, 2000] Khmelnitsky, E. (2000). On an optimal control problem of train operation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(7):1257–1266. Ikusi 7 orrialdea.
- [Liu et al., 2020] Liu, R., Li, S., Yang, L., and Yin, J. (2020). Energy-efficient subway train scheduling design with time-dependent demand based on an approximate dynamic programming approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 50(7):2475–2490. Ikusi 7 orrialdea.
- [Liu and Li, 2019] Liu, Y. and Li, W. (2019). An ato multi-objective optimization control strategy based on genetic algorithm. In *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, page 1214–1218. IEEE. Ikusi 9, 10 orrialdeak.
- [Lu et al., 2013] Lu, S., Hillmansen, S., Ho, T. K., and Roberts, C. (2013). Single-train trajectory optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2):743–750. Ikusi 8 orrialdea.
- [Lu et al., 2016] Lu, S., Wang, M. Q., Weston, P., Chen, S., and Yang, J. (2016). Partial train speed trajectory optimization using mixed-integer linear programming. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(10):2911–2920. Ikusi 7 orrialdea.
- [Martínez Fernández et al., 2019] Martínez Fernández, P., Villalba Sanchís, I., Yepes, V., and Insa Franco, R. (2019). A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 222:153–162. Ikusi 7, 8 orrialdeak.
- [Midya and Thottappillil, 2008] Midya, S. and Thottappillil, R. (2008). An overview of electro-magnetic compatibility challenges in european rail traffic management system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(5):515–534. Ikusi 3 orrialdea.
- [Miyatake and Ko, 2010] Miyatake, M. and Ko, H. (2010). Optimization of train speed profile for minimum energy consumption. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 5(3):263–269. Ikusi 6 orrialdea.
- [Mo et al., 2019] Mo, P., Yang, L., and Gao, Z. (2019). Energy-efficient train operation strategy with speed profiles selection for an urban metro line. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(4):348–360. Ikusi 9, 10 orrialdeak.
- [Orbegozo del Río, 2015] Orbegozo del Río, A. (2015). *Railway Infrastructure Simulation Software Test and Validation*. PhD thesis, University of Navarra. Ikusi 16 orrialdea.
- [Price, 1996] Price, K. (1996). Differential evolution: a fast and simple numerical optimizer. In *Proceedings of North American Fuzzy Information Processing*, page 524–527, Berkeley, CA, USA. IEEE. Ikusi 29, 32 orrialdeak.
- [Sepesy Maučec and Brest, 2019] Sepesy Maučec, M. and Brest, J. (2019). A review of the recent use of differential evolution for large-scale global optimization: An analysis of selected algorithms on the cec 2013 lsgo benchmark suite. *Swarm and Evolutionary Computation*, 50:100428. Ikusi 29 orrialdea.
- [ShangGuan et al., 2015] ShangGuan, W., Yan, X.-H., Cai, B.-G., and Wang, J. (2015). Multiobjective optimization for train speed trajectory in ctcs high-speed railway with hybrid evolutionary algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4):2215–2225. Ikusi 8, 9, and 11 orrialdeak.
- [Sicre et al., 2014] Sicre, C., Cucala, A., and Fernández-Cardador, A. (2014). Real time regulation of efficient driving of high speed trains based on a genetic algorithm and a fuzzy model of manual driving. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 29:79–92. Ikusi 8 orrialdea.

- [Sicre et al., 2012] Sicre, C., Cucala, A. P., Fernández, A., and Lukaszewicz, P. (2012). Modeling and optimizing energy-efficient manual driving on high-speed lines. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 7(6):633–640. Ikusi 9 orrialdea.
- [Sicre et al., 2010] Sicre, C., Cucala, P., Fernández, A., Jiménez, J. A., Ribera, I., and Serrano, A. (2010). A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling. page 549–560. Ikusi 8 orrialdea.
- [Sicre Vara del Rey, 2013] Sicre Vara del Rey, C. M. (2013). Diseño eficiente de servicios ferroviarios y control de la conducción en alta velocidad. Ikusi 12 orrialdea.
- [Yin et al., 2017] Yin, J., Tang, T., Yang, L., Xun, J., Huang, Y., and Gao, Z. (2017). Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 85:548–572. Ikusi 4, 5 orrialdeak.