

Resum

L'objectiu principal del projecte és desenvolupar una sèrie de transformacions en l'estructura externa dels trens de mercaderies per tal de disminuir la seva resistència a l'avanç. D'aquesta manera els trens dissenyats per a circular a baixes velocitats podran augmentar la seva celeritat de servei com a conseqüència d'un decreixement important en les forces resistives que crea l'aire. El resultat serà un tren de mercaderies preparat per funcionar en vies d'alta velocitat.

L'estudi principal del projecte es basa en la realització de simulacions aerodinàmiques de varis models de trens, a dues velocitats diferents, mitjançant el programa COMSOL Multiphysics. El projecte parteix d'un model de tren de mercaderies existent a l'actualitat. Primerament s'ha dissenyat el model tren de mercaderies i, a continuació, les successives transformacions del mateix, dotant-lo d'un perfil més propi de trens d'alta velocitat, emprant el programa de disseny per ordinador SolidWorks. S'han realitzat simulacions per cada model de la locomotora, amb un vagó i amb dos vagons.

Un cop fetes totes les simulacions necessàries, s'analitzen les dades obtingudes, els gràfics de velocitats i pressions i els valors de la força de resistència a l'avanç de cada model dissenyat.

La realització d'aquest projecte pot garantir que, incorporant modificacions aerodinàmiques al disseny original, s'aconsegueix un augment de la velocitat de creuer a igualtat de potència. D'aquesta manera es redueix el temps de desplaçament en el transport de mercaderies, i probablement augmenti el nombre de clients que es decantin pel transport ferroviari de mercaderies, en detriment d'altres modes com pot ser el transport per carretera. S'aconseguiria, d'aquesta manera, una reducció notable d'agents contaminants.



Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte	7
2.2. Motivació	7
2.3. Requeriments previs	7
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte	9
4. EL TRANSPORT DE MERCADERIES	11
4.1. Anàlisi de la situació actual.....	11
4.1.1. La manca de competitivitat en matèria econòmica.....	12
4.1.2. La manca de qualitat / fiabilitat del servei.....	12
4.1.3. Pla d'acció.....	13
4.2. El corredor del mediterrani	13
4.3. L'actual tren de mercaderies	14
5. ESTUDI EXPERIMENTAL	17
5.1. Dinàmica del tren.....	17
5.1.1. Equació del moviment del tren.....	18
5.1.2. Resistència a l'avanç	19
5.1.3. Resistència aerodinàmica.....	20
5.1.4. Equació simplificada de la resistència a l'avanç	21
5.2. Estudis en túnels de vent	22
5.2.1. Experiments a escala.....	22
5.2.2. Estudi amb tren a escala.....	23
5.2.3. Escenari.....	23
5.2.4. Coeficients aerodinàmics en pis pla	25
5.2.5. Coeficients aerodinàmics en pis pla i balast.....	27
6. ESTUDI TEÒRIC	29
6.1. Preliminars a la simulació	29
6.1.1. Modelat de Flux Computacional	29
6.1.2. Mètode dels Elements Finitos	29

6.2. COMSOL Multiphysics.....	30
6.2.1. Descripció general	30
6.2.2. Mòdul CFD.....	31
6.3. Base de les simulacions realitzades.....	32
6.3.1. Model utilitzat	32
6.3.2. Models que es faran servir.....	33
6.4. Simulacions 3D.....	36
6.4.1. Procés per realitzar la simulació	37
6.4.2. Mètode per extreure els resultats de la simulació.....	42
6.5. Resultats de les simulacions	44
6.5.1. Model 1: Tren de mercaderies.....	44
6.5.2. Model 2: AVE 112.....	49
6.5.3. Model 3: Shinkansen A-300.....	52
6.5.4. Model 4: Shinkansen A-300 amb cua.....	56
6.5.5. Model 5: Disseny propi	59
6.5.6. Resum dels resultats	63
6.6. Recomanacions.....	68
7. PRESSUPOST	71
8. ANÀLISI MEDIAMBIENTAL	75
8.1. Impacte mediambiental del transport de mercaderies	75
8.1.1. Introducció de dades en el software	75
8.1.2. Resultats.....	76
8.2. Impacte ambiental degut al procés de fabricació.....	80
CONCLUSIONS	81
BIBLIOGRAFIA	83
Referències bibliogràfiques.....	83
Bibliografia complementària.....	83

ANNEXOS



1. Glossari

- CFD

Computational Fluid Dynamics, o "Dinàmica de fluids computacional", és una branca de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes que involucren fluxos de fluids.

- CAD

Computer-Aided Design, o "Disseny assistit per ordinador", és l'ús d'ordinadors per a assistir en el disseny d'un producte. Els programes de software actuals van des de sistemes de dibuix tècnic 2D fins a modelatge de sòlids i superfícies 3D.

- PEIT

Plan Estratégico para el Impulso del Transporte ferroviario de mercancías en España o "Pla estratègic per l'impuls del transport ferroviari de mercaderies a Espanya", aborda la planificació del conjunt de les actuacions en matèria d'infraestructures i transports que són competència del Ministeri de Foment.

- TSI

Technical Specification for Interoperability, o "Especificació tècnica d'interoperabilitat", són especificacions elaborades per l'Agència Ferroviària Europea i adoptada en una decisió de la comissió europea, per garantir la interoperabilitat del sistema ferroviari transeuropeu.

- CEN

Comité Européen de Normalisation, o "Comitè Europeu de Normalització", és una organització sense ànim de lucre. La missió és fomentar l'economia europea en el comerç mundial, el benestar dels ciutadans europeus i el medi ambient, proporcionant una infraestructura eficient a les parts interessades per el desenvolupament, manteniment i distribució dels conjunts coherents de les normes i especificacions.



2. Prefaci

En una època on l'economia passa per una crisi mundial, hi ha un problema energètic greu i una forta consciència mediambiental, s'ha de procurar ser eficient. Això vol dir que s'han d'expressar els recursos existents al màxim per realitzar les tasques que desenvolupen les empreses i s'ha d'intentar que la natura no se'n vegi afectada. Últimament els enginyers prenen interès en projectes relacionats amb energies netes i altres tecnologies ecològiques. Una manera de contribuir a l'avanç d'una societat més sostenible, és la reducció de les emissions de gasos que produeixen l'efecte hivernacle.

2.1. Origen del projecte

La xarxa de transports ferroviaris de l'Estat està eclipsada pel transport per carretera. Degut a una sèrie de causes és més econòmic transportar mercaderies en camió. Això pot canviar amb l'actuació de l'Estat per millorar les infraestructures i altres mancances.

Ja que es buscava un temari on aparegués una part ambiental i una part tècnica, es van plantejar diverses idees, però finalment es va escollir les transformacions aerodinàmiques dels trens. Era ideal ja que combinava la reducció de les importants emissions de camions amb un estudi aerodinàmic del tren. Més endavant es va incorporar la idea d'usar els trens en vies d'alta velocitat, així millorava l'eficiència, ja que s'aprofita una infraestructura ja existent quan no s'utilitza.

2.2. Motivació

Els dos integrants del projecte van fer l'especialització de fluidodinàmica, així que hi havia una gran motivació en realitzar un projecte d'aquestes característiques. A més a més, s'havia d'utilitzar un programari de càlcul numèric desconegut que, en un futur, pot ser molt útil.

2.3. Requeriments previs

Per realitzar aquest projecte s'ha hagut de fer un estudi previ d'aerodinàmica en trens, a més a més de les nocions adquirides durant les assignatures relacionades amb la matèria. Aquest estudi es va realitzar per poder interpretar els resultats amb criteri. Així es tindria una idea de l'ordre de magnitud que han de tindre.

També s'han necessitat nocions sobre l'ús del programari de computació. Així que s'ha estudiat el funcionament dels programes durant un temps previ a l'inici del projecte.



3. Introducció

Les línies de tren d'alta velocitat són una gran infraestructura d'elevat cost, una manera de reduir els costos és fer circular trens de càrrega. Aquesta tasca no és senzilla degut a que es podrien fer cues per culpa de la diferència de velocitat entre els trens d'alta velocitat i els de mercaderies. No obstant, de nit no hi ha línia de passatgers, així que seria fàcil explotar aquest recurs.

Per desenvolupar aquesta idea seria interessant maximitzar les característiques de càrrega i velocitat dels trens. Com que les vies d'altres velocitats no passen per nuclis urbans es pot mantenir la màxima velocitat durant quasi tot el trajecte. D'aquesta deducció neix l'objectiu principal del projecte, millorar l'aerodinàmica del tren per elevar la velocitat màxima del comboi.

3.1. Objectius del projecte

Tot i que el títol del projecte defineix clarament la finalitat del projecte, hi ha un conjunt d'objectius derivats de la idea principal. L'estudi amb el programa de càlcul numèric té com a finalitat avaluar les diferents formes aerodinàmiques que hi ha al mercat i comparar-les entre elles. Així doncs es té una idea de la diferència que hi ha entre els disseny dels trens de càrrega amb els d'alta velocitat.

Amb un major ús del tren pel transport de mercaderies es disminueix el transport per carretera. Això comporta canvis notables sobre el nivell de contaminants emesos a l'atmosfera. Aquest fet es molt positiu mediambientalment, i es defineix com un dels objectius derivats de l'ús del tren pel transport.

3.2. Abast del projecte

En un principi hi ha un període de cerca d'informació sobre l'estat actual del transport de mercaderies. En aquest capítol s'informa sobre els problemes existents i l'actuació de l'Estat per resoldre'ls. Després es recopila la teoria de la dinàmica del tren i les forces de resistència aerodinàmica. A més a més de l'estudi, es recopila informació sobre experiments reals en túnels de vent, per tal de tenir una idea sobre els fenòmens que afecten els trens a altes velocitats.

El nucli d'aquest estudi és, clarament, el càlcul computacional de l'aerodinàmica dels diferents models de tren. S'ha utilitzat un programa de càlcul numèric per realitzar les simulacions. Finalment s'interpretaran els resultats segons les forces i coeficients obtinguts.

En aquest projecte no s'ha realitzat un estudi de la part corresponent a les rodes dels trens, anomenada *bogies*, considerant els baixos dels trens com si fossin plans. El motiu d'aquesta decisió és la complexitat de disseny i l'augment del temps de processat del software emprat.



4. El transport de mercaderies

El transport pren un paper molt important per al bon desenvolupament econòmic de qualsevol indústria, ja sigui per aire, carretera, mar o vies de tren, la seva gestió afecta directament a qualsevol empresa.

És important saber quines són les opcions actuals pel transport de mercaderies, com un govern té previst millorar-ho i quins modes es podrien explotar més. El transport ferroviari és escàs a l'Estat espanyol, encara es pot millorar la qualitat i quantitat del seu ús.

4.1. Anàlisi de la situació actual

Espanya és un dels països amb la menor quota modal de transport ferroviari de mercaderies entre els països més significatius de la UE, sent a més el que majors descensos ha experimentat respecte al conjunt d'aquests països en l'última dècada.

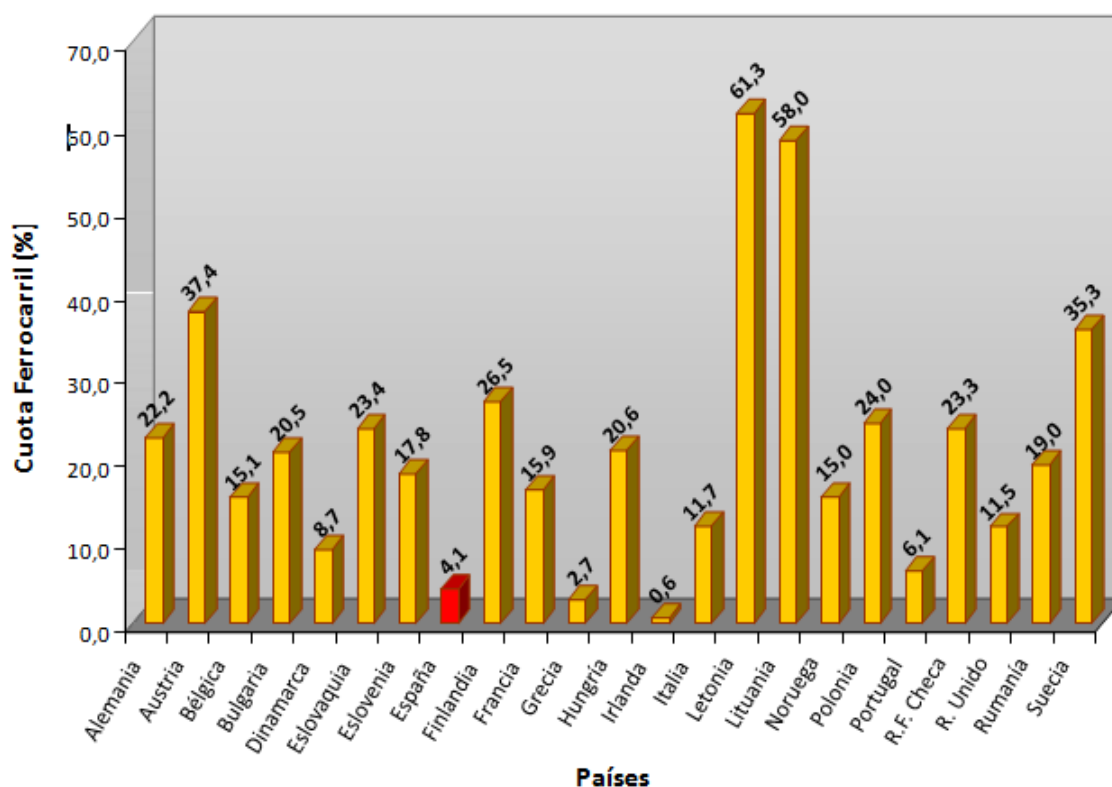


Fig. 4.1. Percentatge d'ús de ferrocarril en països europeus. Font: Eurostat 2008.

Es poden sintetitzar en dos grans blocs les causes de l'estat de la situació actual: la manca de competitivitat econòmica i la manca tant de qualitat com fiabilitat del servei.

4.1.1. La manca de competitivitat en matèria econòmica.

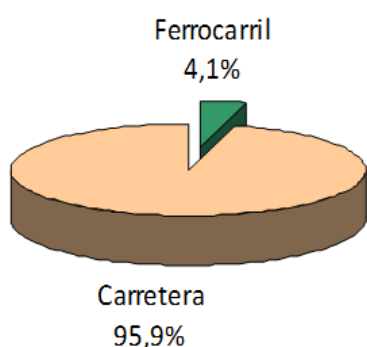
Tot i que el cost unitari de la tona transportada per ferrocarril en condicions normals d'exploració hauria de ser inferior al cost per carretera per distàncies mitjanes i llargues (més de 600 km), a la pràctica no és així a causa de:

- Costos ineficients, com costos de maniobres innecessàries, canvi d'ample, etc.
- La manca d'inversions específiques pel transport ferroviari de mercaderies a Espanya.
- Baix aprofitament de recursos disponibles. (Per exemple 65.000 km/any de recorregut mitjà real per locomotora, davant els 120.000 km / any d'un camió i 2,5 h/dia de conducció efectiva mitjana dels maquinistes davant 9h/dia de conducció efectiva de la carretera). Això genera grans dèficits d'exploració a l'empresa ferroviària.

4.1.2. La manca de qualitat / fiabilitat del servei.

Es reflecteix tant en el descens del transport ferroviari com en les opinions dels usuaris i és degut fonamentalment a la rigidesa i lentitud de resposta de les entitats públiques ferroviàries i a les necessitats del mercat, que presenten deficiències en matèria de qualitat i competitivitat dels serveis que presten.

Distribución modal del transporte de mercancías terrestre en España (Mt x km)



Distribución por modos del transporte interior de mercancías en España (Mt x km)

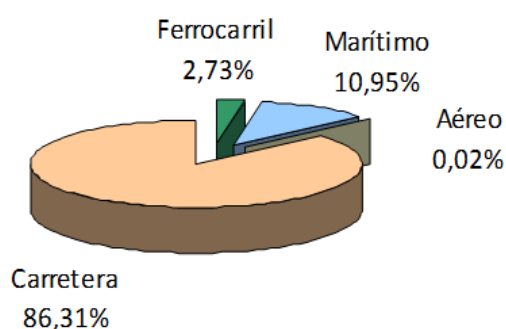


Fig. 4.2. Distribuciones modals del transport terrestre i interior. Font: Ministeri de Foment 2008.

Degut a aquestes causes es generen uns efectes negatius en el desenvolupament comercial espanyol:



- Pèrdua de competitivitat del teixit productiu espanyol, en el qual la importància dels costos logístics és crítica en allargar les cadenes entre modes, i especialment al nostre país per la seva situació perifèrica dins de la UE.
- Importants costos externs (congestió viària, seguretat ...), incloent un negatiu impacte ambiental, per l'ús massiu de la carretera.
- Increment de la dependència energètica de combustibles fòssils derivada de la baixa utilització del sistema ferroviari.
- Sistemàtica degradació de la col·laboració entre els modes de transport.
- Possible irreversibilitat del procés per l'evolució experimentada pels altres modes concurrents.
- Desequilibri modal.

4.1.3. Pla d'acció

L'incompliment dels objectius d'integració del sistema de transports, d'augment de la seva sostenibilitat i competitivitat, així com els de redistribució modal, i de desenvolupament del transport ferroviari, assenyalats com prioritaris tant en la Política Comunitària de Transports, com en el PEIT espanyol [1], genera greus perjudicis econòmics i ambientals al país.

Degut a aquesta realitat l'estat espanyol dissenya un pla per millorar el transport de mercaderies en ferrocarril, imposant uns objectius que dupliquen la taxa d'ús actual, és a dir, entre el 8 i el 10%.

El pla d'acció consta d'un conjunt de solucions i reformes que milloren qualitativament i quantitativament el transport en tren. En concret hi ha un apartat rellevant a un estudi aerodinàmic, per a l'ús de trens de mercaderies en vies d'alta velocitat. Amb aquesta solució s'incrementa la xarxa ferroviària bàsica de mercaderies i s'amortitzen els costos de construcció de les línies de l'AVE. A més a més es reduïrien considerablement els colls d'ampolla que pateix l'actual xarxa.

4.2. El corredor del mediterrani

El Corredor del Mediterrani és un conjunt de vies ferroviàries que discorre principalment paral·lel a la costa mediterrània, a l'est d'Espanya.[2]

El terme s'utilitza per descriure diverses línies diferents en el mateix corredor, tant pel seu tipus (alta velocitat, línia convencional, línia de mercaderies ...), la seva situació, com el seu àmbit (des de

Barcelona -València a tota la Mediterrània). Totes aquestes línies estan relacionades entre si en unir les mateixes ciutats i compartir diversos trams i estacions.

El Corredor del Mediterrani consta d'una línia d'alta velocitat que podria ser usada pel transport de mercaderies. Aquesta combinació mixta d'usar trens de mercaderies en aquest tipus de vies donaria lloc als trens llançadora, uns trens que aprofitarien les infraestructures de l'AVE per transportar contenidors del sud al nord de la península. Aquest és l'objectiu concret pel qual s'ha realitzat aquest projecte, aquestes són les principals vies per on circularien els trens de mercaderies modificats.

4.3. L'actual tren de mercaderies

El tren de mercaderies de major ús a l'estat espanyol és el Renfe 253, fabricat per Bombardier, és un dels més famosos a tota Europa, tot i que fora d'Espanya rep un altre nom.



Fig. 4.3. Model Bombardier 253. Font: Wikimedia.

Aquest tren actualment circula a unes velocitats màximes de 100 i 120 km/h, tot i que actualment s'ha incrementat aquest límit de velocitat fins als 140 km/h en alguns països de la comunitat europea. Un dels objectius del nou pla nacional per millorar el transport és incrementar quantitativament aquesta velocitat fins arribar als 150 - 160 km/h. Aquesta mesura és possible tenint en compte que no hi hagi colls d'ampolla i que la velocitat màxima del model donada pel fabricant és de 140km/h. L'ús de les vies de l'AVE faria possible aquesta mesura, sempre i quan es fessin algunes modificacions en l'aerodinàmica, ja que la resistència a l'avanç per a les noves velocitats s'incrementa de forma quadràtica, això faria possible un increment de la velocitat màxima del fabricant.





Fig. 4.4. Tren de mercaderies amb càrrega. Font: Flickr Yahoo

L'altra gran modificació que té previst el nou pla de foment és l'augment de la llargària del tren. Actualment els trens tenen una longitud de 450m, tot i que s'han fet proves a llargàries superiors 600m i 750m. En un futur pròxim els trens de mercaderies tindran una longitud de 750m, fet que millorarà els costos del transport ferroviari de mercaderies.



5. Estudi experimental

És necessari fer un estudi previ sobre quines forces afecten el tren, com varien aquestes forces i com evolucionen amb el moviment. També és important conèixer algun tipus d'estudi que mostri quins valors reals poden prendre aquestes forces. Una eina per aconseguir dades experimentals és el túnel de vent.

En els següents apartats apareixen anotacions importants sobre la dinàmica del tren i un experiment en túnel de vent que faciliten la interpretació dels resultats teòrics.

5.1. Dinàmica del tren

La dinàmica longitudinal es refereix a les components de les forces sobre l'eix longitudinal de la via. Les components de les forces sobre els altres dos eixos s'estudien en el domini de la infraestructura, ja que condicionen la resistència d'aquesta. L'estudi se centrarà en les forces longitudinals.

Les forces que actuen longitudinalment sobre el tren són de dos tipus:

- Forces passives: que són les que suporta el tren sense que ell mateix faci cap acció especial. Són forces passives la resistència a l'avanç (en recta i en corba) i la força gravitatòria.
- Forces actives: són aquelles que es deriven d'accions del propi tren, en concret, són les forces de tracció i frenada.

Es denomina resistència a l'avanç la resultant de les forces que s'oposen al moviment del tren en la direcció longitudinal de la via, diferents de les gravitatòries i de les forces de tracció i frenada. La resistència a l'avanç és sempre una força de valor negatiu (s'oposa al moviment del tren), d'acord amb les coordenades definides.

En realitat, la resistència total a l'avanç és la projecció sobre la direcció longitudinal de la via de diverses forces passives que actuen sobre el tren i que són de diferent naturalesa, entre les quals es poden distingir les següents:

- Fregament entre les rodes i els carrils.
- Fregaments interns de les parts mòbils i giratòries del tren.
- Força necessària per accelerar l'aire que entra al tren (per a la refrigeració dels motors i per a la renovació de l'aire interior).

- Resistència aerodinàmica, que al seu torn es compon de resistència de pressió i de fricció, i que resulta especialment important en alta velocitat.
- Fregament de les pestanyes sobre el carril en les corbes.

La resistència a l'avanç d'un tren varia gairebé constantment, ja que el tren passa successivament per alineacions rectes i per corbes de diversos radis. Però també s'ha de considerar que la resistència a l'avanç en recta és dependent de la velocitat del tren, de manera que qualsevol variació de la velocitat real condueix a una variació de la resistència a l'avanç en recta i, per això, de la resistència al avanç total.

A més de la resistència a l'avanç, cal tenir en compte l'efecte de la força de la gravetat, que actua sobre el tren a les pendents (a favor del moviment) i en les rampes (en el sentit d'oposar-se al moviment).

També actuen sobre el tren en sentit longitudinal les forces actives de tracció (a favor del moviment) i de fre (oposant-se al moviment), que es realitzen des del propi tren.

Si les projeccions de totes aquestes forces sobre l'eix longitudinal estan en equilibri (tenen resultant nul·la), el tren manté la seva velocitat constant. Per contra, si la resultant és una força neta positiva, el tren s'accelerará d'acord amb la segona llei de Newton, i si és una força negativa, el tren reduirà la seva velocitat, d'acord amb la mateixa llei. [3]

5.1.1. Equació del moviment del tren

Per accelerar el tren amb una acceleració de $a \text{ m/s}^2$ cal fer una força:

$$F_{ac} = 1000 \cdot \left[m \cdot a + \left(m_g \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) \cdot a \right]$$

(Eq. 5.1.)

On:

- m_g és la massa del conjunt giratori, en T.
- r és el radi d'inèrcia polar del conjunt, en m.
- R és el radi de les rodes motrius, en m.



5.1.2. Resistència a l'avanç

La resistència a l'avanç del tren es pot expressar:

$$R_a = - \left[(a_1 \cdot m) + (a_2 \cdot N) + \left[\frac{(Q \cdot \rho) \cdot V}{36} \right] + \left[(c_p \cdot A_f) + (c_f \cdot p \cdot L) \right] \cdot T_f \cdot (V - V_w \cdot \cos \alpha)^2 + \left(m \cdot \frac{600}{R} \right) \right] \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Els dos primers termes corresponen a la resistència mecànica i forces gravitatòries, el tercer a la resistència creada per l'entrada d'aire del tren, el quart, cinquè i sisè són la resistència aerodinàmica i l'últim la resistència en corbes.

On:

- a_1 és el coeficient de resistència mecànica a l'avanç per unitat de massa (daN/T), amb valors típics de 0,65.
- m és la massa del tren (en tones).
- a_2 és el coeficient de la resistència mecànica a l'avanç per nombre d'eixos (daN/eix), amb valors típics de 13.
- N és el nombre d'eixos del tren.
- Q és el flux de l'aire que entra al tren per a la refrigeració dels motors i l'aire condicionat (en m^3/s).
- ρ és la densitat de l'aire (típicament $1,29 \text{ kg}/\text{m}^3$).
- V és la velocitat del tren (en km/h).
- c_p és el coeficient de pressió del terme aerodinàmic de la resistència a l'avanç.
- A_f és l'àrea frontal del tren en m^2 .
- c_f és el coeficient de fricció del terme aerodinàmic de la resistència a l'avanç.
- P és el perímetre del tren en m.
- L és la longitud del tren en m.
- T_f és el factor de túnel, adimensional, que depèn de la secció del tren i del túnel i de la velocitat (valors típics de 1,2 a 2).

- V_w és la velocitat absoluta del vent (en km/h).
- α és l'angle que forma el rumb del vent amb el rumb del tren.
- R és el radi de la corba, en metres.

A la Fig. 5.1 es mostra l'evolució de la influència de diferents tipus d'impediments a l'avanç d'un tren en funció de la velocitat d'aquest. Es pot observar que a baixes velocitats la dificultat màxima al moviment és la que presenta el propi pes del vehicle (resistència gravitatòria), però que a mesura que augmenta la velocitat guanya rellevància la resistència aerodinàmica, degut això a les friccions que presenta l'aire amb el cos del ferrocarril a majors velocitats

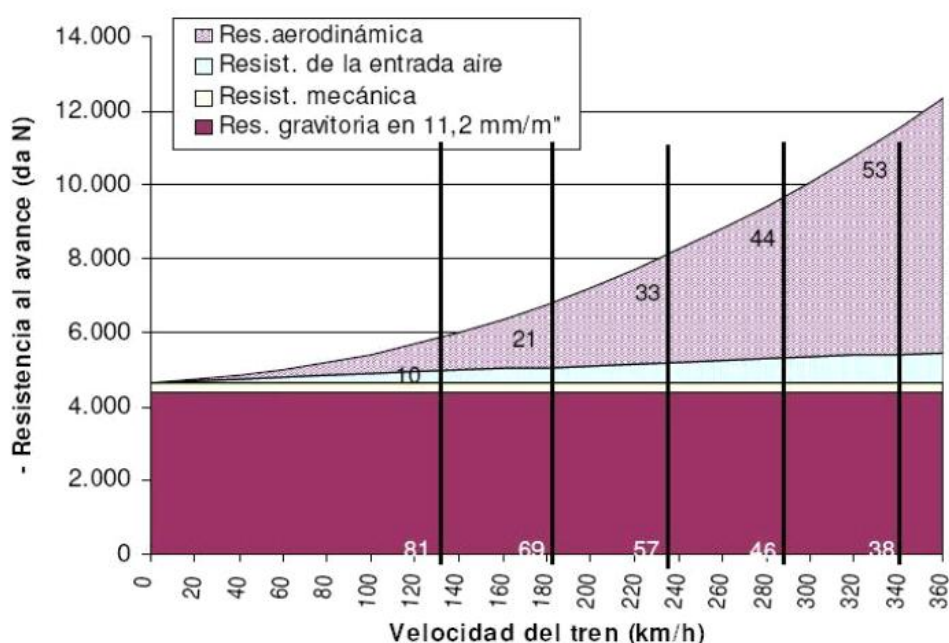


Fig. 5.1. Resistències segons la velocitat del vent. Font: Wikipedia

5.1.3. Resistència aerodinàmica

Anomenem resistència aerodinàmica a l'avanç a la força longitudinal que s'oposa al moviment del tren com a conseqüència de la interacció entre el tren i l'aire circumdant amb què xoca i que l'envolta.

En absència del vent exterior, la resistència aerodinàmica a l'avanç és proporcional al quadrat de la velocitat del tren, i té, per això, com a expressió general:

$$R_{aerod} = C \times V^2$$

(Eq. 5.3)



Es produeix per pressió a l'exterior del tren i per la fricció aerodinàmica en tota l'àrea mullada (entenent per tal la superfície amb la qual fricciona l'aire). En funció de la naturalesa de la força, aquesta resistència està integrada en dos components: resistència de fricció i resistència de pressió.

Sobre aquesta resistència, de caràcter complex, poden formular les següents consideracions:

- La resistència aerodinàmica de pressió és la projecció en la direcció del moviment de la resultant de les forces de pressió que actuen sobre la superfície del cos. Depèn fonamentalment de la secció transversal del tren (en cap i cua), i de la forma del cap i cua del tren. També depèn dels aparells situats al sostre del vehicle i dels *bogies*.
- La resistència aerodinàmica de fricció és deguda a la viscositat de l'aire, i depèn fonamentalment de la superfície mullada del cos (és a dir el perímetre del tren per la seva longitud) i de la seva continuïtat i rugositat superficial. A l'interior dels túnels, la resistència aerodinàmica a l'avanç augmenta com a conseqüència de la major fricció de l'aire contra la paret exterior del tren. L'efecte pràctic és que en la resistència a l'avanç aerodinàmica s'ha d'incloure un coeficient d'obstrucció (o factor túnel, T_t), adimensional, que multiplica el terme relacionat amb el quadrat de la velocitat.

A més de l'esmentat anteriorment, hem de tenir en compte la velocitat del vent exterior. A la pràctica només es pot conèixer amb certa aproximació la força i direcció del vent dominant i l'angle que forma la via amb les coordenades geogràfiques, que no sol tenir variacions brusques. No obstant per fer l'estudi aerodinàmic hi haurà prou en fer l'estudi considerant una velocitat del vent exterior nul·la.

5.1.4. Equació simplificada de la resistència a l'avanç

L'expressió més habitual de la resistència a l'avanç s'expressa, de forma simplificada, de la següent manera:

$$R_a = -(A + B \times V + C \times V^2)$$

(Eq. 5.4)

On:

- R_a és la resistència a l'avanç; que s'expressa normalment en daN. Serà sempre de valor negatiu, ja que s'oposa al moviment del tren i té sentit contrari a la velocitat V .
- V és la velocitat del tren, expressada normalment en quilòmetres per hora (km/h).

- A, B i C són coeficients que depenen de les característiques del material rodant que es mesuren, respectivament, en daN, daN/km/h i daN/km²/h².

5.2. Estudis en túnels de vent

Per realitzar aquest capítol s'ha cercat informació sobre projectes experimentals d'equips d'enginyers especialitzats en túnels de vent. Els estudis són amplis, tenen en compte molts factors sobre el terreny de les vies i usen uns models fixats de trens. Així que resulta difícil trobar una comparativa experimental semblant a la que s'ha realitzat en aquest projecte. No obstant dóna una idea aproximada sobre la variació dels coeficients de resistència a l'avanç i la importància de la superfície del terra.

5.2.1. Experiments a escala

Per a que els experiments a escala puguin emular situacions reals, s'ha de complir una sèrie de requeriments [4]: nombre de Reynolds, geometria i nombre de Mach similar.

5.2.1.1. Un nombre de Reynolds similar:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

On:

ρ : densitat del fluid en kg/m³.

v_s : velocitat característica del fluid en m/s.

D : Diàmetre de la canonada a través de la qual circula el fluid en m.

μ : viscositat del fluid en Pa·s.

Per realitzar l'experiment no és necessari que el Reynolds del model i el prototip siguin iguals, només que estiguin en el mateix rang de flux, és a dir, que ambdós siguin turbulents o laminars.

5.2.1.2. Geometria similar

La forma del model ha de ser una còpia el més acurada possible del prototip.



5.2.1.3. Nombre de Mach similar

$$M = \frac{V}{V_s} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

On:

V: velocitat de l'objecte en m/s.

V_s: velocitat del so en m/s.

El Mach de la velocitat de l'experiment ha de pertànyer al mateix rang de les condicions reals, és a dir, que sigui compressible o incompressible.

Si Ma<0,3 el flux és incompressible, en canvi si Ma>0,3 el flux és compressible.

5.2.2. Estudi amb tren a escala

Aquest és un estudi realitzat pel departament d'enginyeria mecànica de la Universitat Politècnica de Milà [5]. Pretén quantificar les velocitats de risc excessiu davant els efectes del vent lateral sobre diferents infraestructures.

L'estudi conté diversos models i proves experimentals relacionades amb els canvis dels coeficients aerodinàmics quan el model es situat en diferents infraestructures. Com que aquest projecte no contempla aquests canvis, aquest estudi servirà per indicar com seran els coeficients per un únic model.

En aquest cas s'han estudiat diferents coeficients aerodinàmics per a un model de tren ETR500 italià, amb centre de gravetat no oscil·lant, i sota les condicions estàndard marcades pel TSI (*Technical Specification for Interoperability*) sobre pis pla.

Es durà a terme mitjançant el model a escala 1:10 per a les simulacions sobre pis pla (amb i sense balast i rails).

Les simulacions es realitzen en condicions de corrent concentrat, i a diferents angles d'atac (β_w), que van des de 0° (direcció paral·lela i oposada al tren) fins a 90° (transversal al ferrocarril).

5.2.3. Escenari

L'escenari amb pis pla correspon a la situació d'un tren recorrent un terreny pla. Per tal d'obtenir un perfil d'obstrucció per a la velocitat principal del vent, l'escenari de pis pla consisteix en una taula

circular de fusta, muntat a una alçada de 0,3m sobre el terra del túnel de vent (Fig. 5.2).



Fig. 5.2. Prova experimental en túnel de vent: model d'ETR500 a escala 1:10 sobre pis pla amb balast i rails. Font: *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*

A la Fig. 5.3 es mostra el perfil de velocitats obtingut sobre la vertical del terra. El gruix de la capa límit és molt baix sobre el rang corresponent a l'alçada del tren H_{train} . La variació de la velocitat del vent està limitada per $\delta_{95\%}$ tal com estipula el TSI. És a dir, que per a realitzar aquest experiment s'ha de garantir que la velocitat al rail ha de ser com a mínim un 95% de la velocitat real.

El test realitzat s'ha fet amb rails, amb i sense balast. L'escenari amb càrrega i rails ha estat realitzat seguint l'estàndard marcat pel CEN (Comitè Europeu de Normalització).



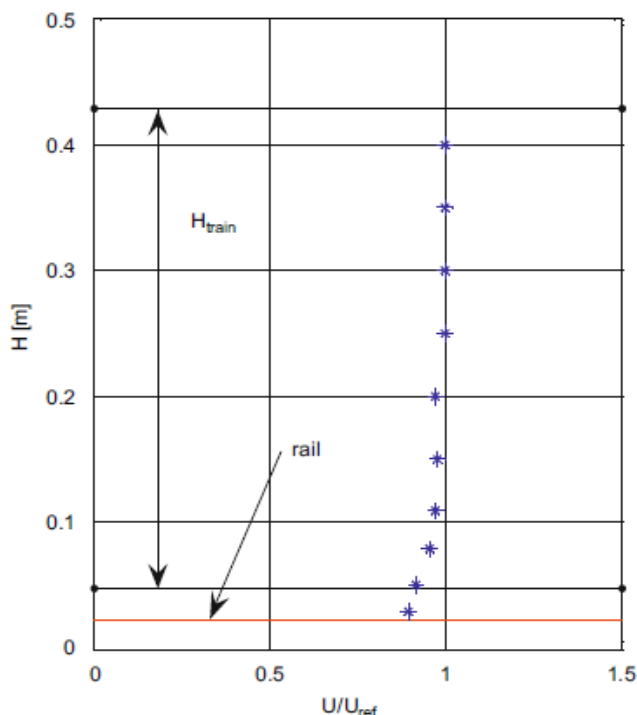


Fig. 5.3. Pis pla sense balast: perfil vertical de la velocitat principal del vent. Font: *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*.

5.2.4. Coeficients aerodinàmics en pis pla

A la Fig. 5.5 es presenten els coeficients aerodinàmics en funció de l'angle d'atac β_w que afecten tant a la locomotora com al primer vagó en el cas en l'escenari amb pis pla, rails, i sense balast, mesurats en el model a escala 1:10 del ETR500. Les direccions x, y i z concorden amb el sistema de referència presentat en la Fig. 5.4.

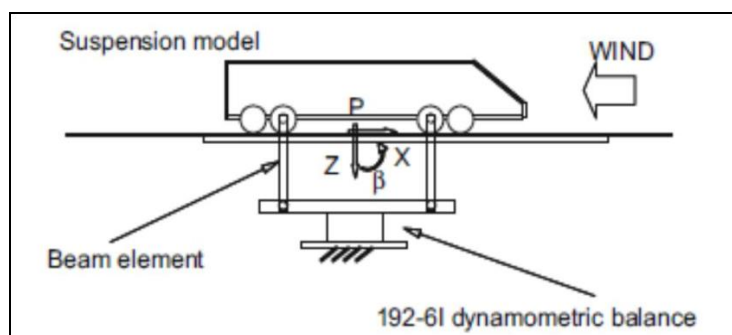


Fig. 5.4. Esquema de connexió entre la balança dinamomètrica externa i el model a escala 1:10. Font: *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*.

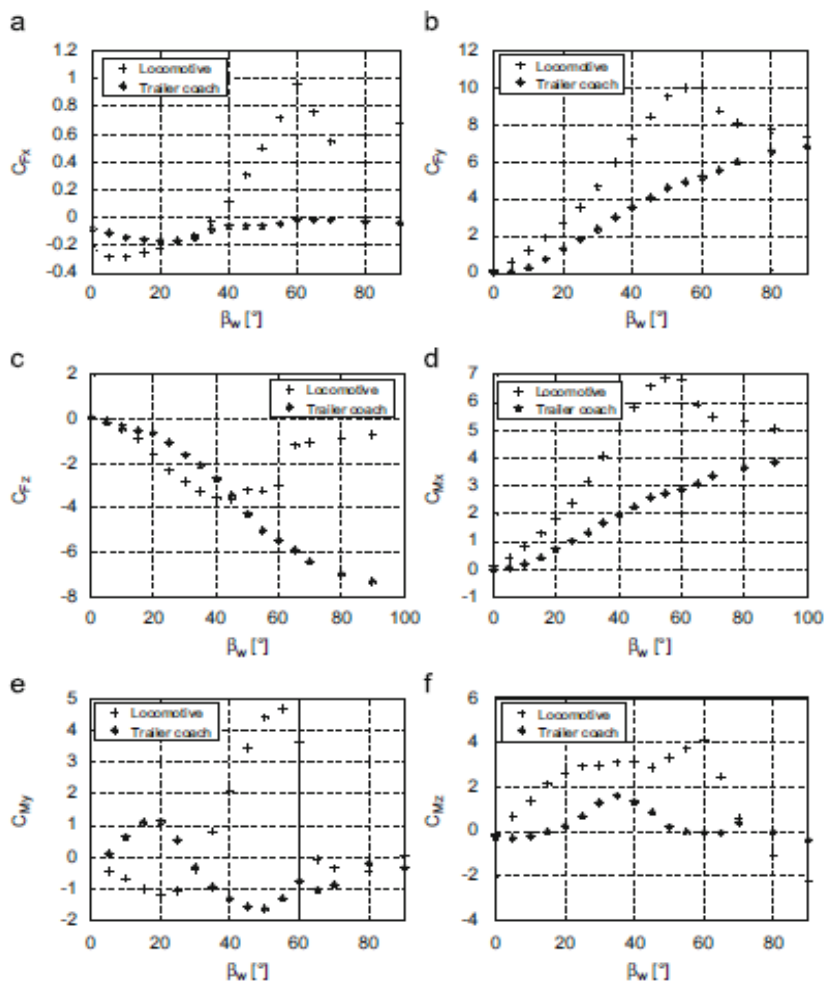


Fig. 5.5. Coeficients de força i moment aerodinàmics del ETR500, model a escala 1:10, sobre pis pla. Locomotora vs. primer vagó. Font: *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*.

Els coeficients aerodinàmics que fan referència a les forces i els moments es determinen mitjançant les següents fórmules:

$$C_{F_i} = \frac{F_i}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad \text{i} \quad C_{M_i} = \frac{M_i}{\frac{1}{2}\rho U^2 S h}$$

(Eq. 5.7 i Eq. 5.8)

On:

F_i ($i=x,y,z$) = components aerodinàmics de la força en el sistema de referència del tren.

M_i ($i=x,y,x$) = components corresponents del moment mesurats en el punt P.

- ρ = densitat de l'aire en kg/m^3 .
- U^2 = quadrat de la velocitat del vent en m/s .



- $h = 3\text{m}$
- $S =$ superfície estàndard de referència igual a 10 m^2

Les forces i moments han estat mesurats pels dispositius que incorpora la maqueta a la Fig. 5.4.

S'observa que el primer vehicle mostra, per a tots els coeficients, un valor màxim per a angles entre 55° i 60° . La tendència observada en la locomotora resulta típica en tots els vehicles capdavanters en configuracions de tren i és deguda a la transició de la zona esvelta de la punta cap a zona ampla. Pel contrari, la força lateral, longitudinal i vertical, així com el moment de bolcada mesurats en el remolc tenen un comportament sempre creixent des dels 0° fins als 90° . D'igual forma, es demostra que el primer vehicle presenta un coeficient de moment de bolcada superior al del segon vehicle per a tots els angles d'atac; i per altra banda, els valors dels coeficients de força vertical de la màquina tractora són més alts que els del vagó següent solament en el rang entre 10 - 45° . En conseqüència, el primer vehicle és considerat com el més crític en termes de bolcada i seria l'únic a considerar en l'anàlisi del risc.

5.2.5. Coeficients aerodinàmics en pis pla i balast

En la següent Fig. 5.6. es comparen els coeficients mesurats en la màquina tractora del ETR500 amb pis pla, aquest cop incloent el balast. Es pot observar que per angles d'atac β_w entre 0° i 30° les principals diferències es presenten en el coeficient de força vertical i el coeficient de moment en l'eix z , que és dependent de la distribució vertical de la força al llarg del vehicle. La presència del balast modifica el flux especialment en la zona dels baixos del vehicle amb la conseqüent variació de la força vertical. En particular, el flux en la zona baixa es veu frenat per la presència del balast i, com a conseqüència, la depressió és menor.

Per a valors grans de β_w , les diferències entre les dues configuracions de simulació es mostren també en els altres coeficients (força lateral i longitudinal, moment en els eixos x i y), especialment en la zona de transició entre la zona esvelta i l'ampla de la locomotora.

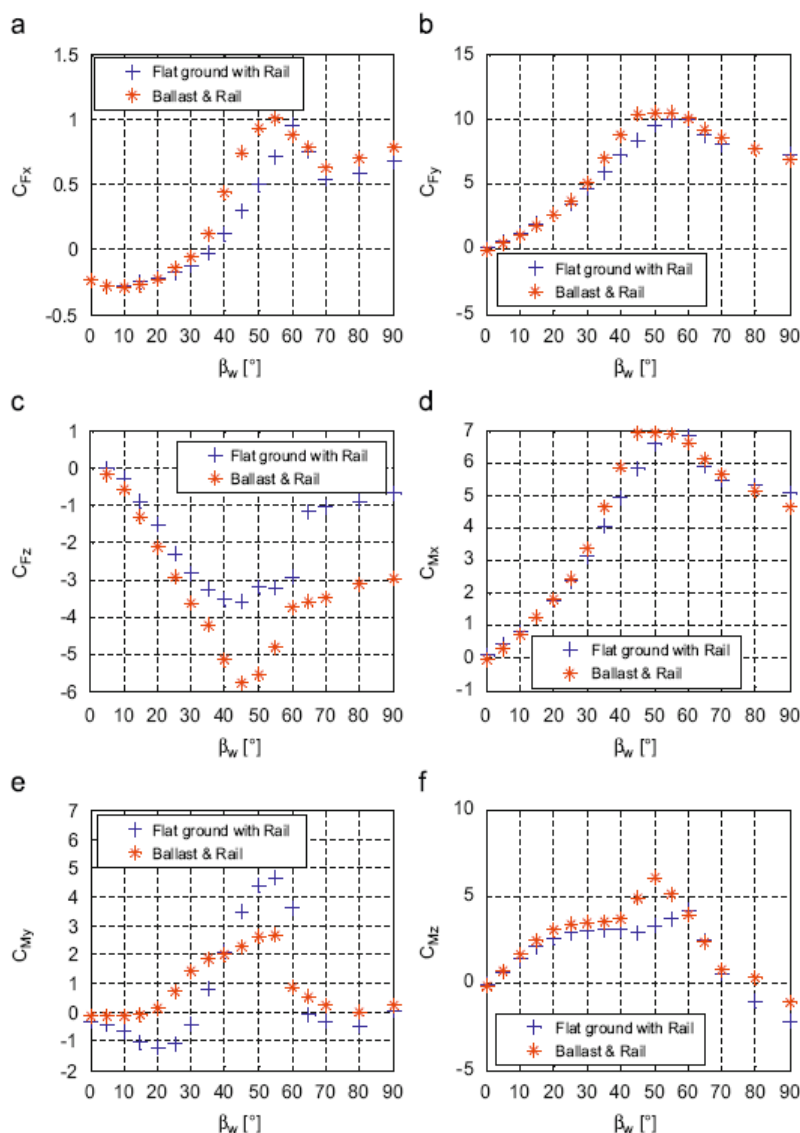


Fig. 5.6. Coeficients de força aerodinàmica del ETR500, model a escala 1:10, sobre pis pla amb rails i sense balast, i sobre pis pla amb balast i rails. Locomotora. Font: *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*.

L'anterior estudi és interessant a l'hora de veure les situacions de risc que comporta el vent lateral. No obstant els coeficients calculats només serveixen per a comparar-los entre sí en una mateixa referència. No són els coeficients de resistència a l'avanç que posteriorment s'estudiaran en l'estudi teòric. Per tant aquest estudi serveix per a determinar la importància del vent lateral, del balast i determinar les condicions d'assaig d'un túnel de vent. Seria bo realitzar un altre estudi calculant els coeficients en direcció perpendicular al flux sense efectes del vent. Així es complementaria el següent estudi teòric.



6. Estudi teòric

6.1. Preliminars a la simulació

6.1.1. Modelat de Flux Computacional

La mecànica de fluids és la part de mecànica de medis continus que estudia el moviment de fluids (tant de líquids com de gasos) i les forces que els propicien. De la mateixa manera, també és motiu d'estudi les interaccions entre el fluid i el contorn que el limita.

El supòsit fonamental que regeix tota la mecànica de fluids és la hipòtesi del medi continu. Aquesta teoria considera que el fluid és continu al llarg de l'espai que ocupa, és a dir, no es té en compte ni la estructura molecular ni les possibles discontinuïtats. Les propietats del fluid, com ara la pressió, densitat, temperatura, etc., són considerades funcions contínues.

La Dinàmica de Fluids Computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) neix de la mà del avenços tecnològics pel que fa a la computació i per la necessitat d'emmagatzemar gran quantitat de dades i realitzar gran nombre d'operacions algebraïques, per tal de donar solució a les equacions de la mecànica de fluids.

La CFD emprà mètodes numèrics i algorítmics per tal de resoldre i analitzar problemes sobre el flux de substàncies. Els ordinadors són utilitzats per realitzar milions de càlculs necessaris per a realitzar la simulació de la interacció del fluid i el cos dissenyat per l'enginyeria.

Els resultats obtinguts, en molts casos, són aproximacions de la realitat, tot i emprar ordinadors amb gran capacitat i equacions simplificades. És per aquest motiu que la CFD ofereix uns resultats propers a la realitat, que proporcionen una idea força fiable, però amb un cert marge d'error. La verificació de la solució obtinguda per CFD pot ser contrastada en túnels de vent o models físics a escala.

Per realitzar el Modelat de Flux per Computació s'han d'establir, primerament, els objectius a assolir, establir les equacions i les condicions de contorn (model matemàtic) i triar un mètode per aproximar les equacions. Els mètodes més importants són el les Diferències Finites, el dels Volums Finites i el dels Elements Finites. El mètode emprat en aquest projecte serà el Mètode dels Elements Finites.

6.1.2. Mètode dels Elements Finites

El Mètode dels Elements Finites és un mètode numèric molt general per a la resolució d'equacions diferencials. El mètode permet obtenir una solució numèrica aproximada sobre un cos, estructura o domini sobre el qual estan definides certes equacions diferencials que caracteritzen el comportament

físic del problema, dividint-lo en un nombre elevat de subdominis no intersecats entre si anomenats elements finits.

El conjunt d'elements finits forma una partició del domini també anomenada discretització. Dins de cada element es distingeixen una sèrie de punts representatius anomenats nodes. Dos nodes són adjacents si pertanyen al mateix element finit, a més, un node sobre la frontera d'un element finit pot pertànyer a diversos elements. El conjunt de nodes, considerant les seves relacions d'adjacència, es diu malla. El nombre d'equacions d'aquest sistema és proporcional al nombre de nodes.

6.1.2.1. Procediment del Mètode dels Elements Finites

El procediment per emprar aquest mètode consta d'un seguit de passos.

Primerament, s'ha de realitzar la discretització, determinant el tipus d'element, la seva forma i la seva mida. El criteri que s'ha de seguir per realitzar el mallat del model és minimitzar l'error que es pot produir alhora de discretitzar. Quant més fina i acurada és la malla realitzada (major nombre de nodes i elements) més propers i fiables seran els resultats a la realitat. S'ha de tenir en compte que a major nombre de nodes, el temps de computació necessari per a trobar una solució al problema augmenta. Per tant s'ha de trobar l'equilibri entre la qualitat de la malla i temps de computació.

Un cop realitzat la malla adequada s'ha d'aplicar a cadascun dels elements que la formen les equacions diferencials i les condicions de continuïtat de l'estudi. S'obtindran un nombre igual de sistemes d'equacions com elements tingui la malla. A continuació s'acoblen els diferents sistemes d'equacions en un de sol, garantint les condicions de continuïtat a la frontera i aconseguint reduir el nombre de variables incògnites.

Un cop realitzat l'acoblament, és el moment d'imposar les condicions de contorn. Dotant de valors les variables en els nodes de la frontera.

S'obté d'aquest procés una matriu que fa referència a un sistema d'equacions reduït. En ser resolt aquest sistema, s'obtindran els resultats, és a dir, els valors de les variables en cadascun dels nodes. Posteriorment, es poden calcular el valor de les propietats d'altres punts de l'element que no són nodes mitjançant la interpolació.

6.2. COMSOL Multiphysics

6.2.1. Descripció general

COMSOL Multiphysics és una eina de modelatge i anàlisi per realitzar prototips virtuals de fenòmens físics. COMSOL Multiphysics pot modelar virtualment qualsevol fenomen físic que l'enginyeria o la



ciència pugui descriure amb equacions diferencials parcials (PDE), incloent transferència de calor, moviment de fluids, electromagnetisme i mecànica estructural, suportant la integració de problemes de diferents camps.

Les principals característiques més destacables són:

- Interfície gràfic manejable i interactiu per a totes les etapes del procés de modelatge.
- Il·limitades prestacions d'estudis de física.
- Incorpora eines CAD per modelatge sòlid en 1D, 2D i 3D.
- Permet la importació d'arxius creats en AutoCAD, CATIA i SolidWorks.
- Generació automàtica i adaptativa de malles, amb un control explícit i interactiu referents a la mida.
- Disponibles els "solvers" més nous, entre els quals destaquen, "solvers" iteratius per problemes estacionals lineals i no lineals, dependents del temps, i de valors propis.
- Postprocessat interactiu que permet visualitzar qualsevol funció de la solució.

COMSOL proporciona mòduls opcionals, per a diferents àrees d'aplicació. Aquests utilitzen els mètodes de terminologia i de solució específica a la disciplina particular. En aquest projecte s'ha utilitzat el mòdul CFD.

6.2.2. Mòdul CFD

El Mòdul CFD s'ha dissenyat per a la simulació avançada de flux. Les seves interfícies permeten modelar fluxos laminars i turbulents en fases simples o múltiples. També inclou funcionalitats per tractar acoblaments de flux de mitjans porosos i lliures, gots agitats i interacció fluid-estructura.

Els acoblaments ja preparats de transferència de calor i massa amb flux de fluids permet modelar una àmplia varietat d'aplicacions industrials com intercanviadors de calor, turbines, unitats de separació, i sistemes de ventilació.

Les seves àrees d'aplicació són, entre d'altres:

- Sistemes de refrigeració per a motors i electrònica.
- Ventiladors i bombes.
- Filtres i unitats de separació.

- Flux al voltant de vehicles i estructures.
- Fluxos en canonades, vàlvules, juntes, broquets, etc.
- Interacció fluid-estructura.
- Fluxos no newtonians en polimerització i processament d'aliments.
- Intercanviadors de calor.

6.3. Base de les simulacions realitzades

6.3.1. Model utilitzat

L'objectiu bàsic del projecte és, partint d'un tren de mercaderies existent a l'actualitat, realitzar un seguit de possibles modificacions per tal de millorar aspectes aerodinàmics en la seva forma. Els possibles canvis a realitzar en el tren original de mercaderies tindran com a referència, en alguns casos, formes i contorns similars a alguns models vigents de trens d'alta velocitat. També s'incorporaran modificacions sense partir de cap model real, únicament realitzant dissenys amb línies regides per l'aerodinàmica capaces de proporcionar una major penetrabilitat a l'aire.

El model que s'agafa com a referència de tren de mercaderies és la locomotora elèctrica de la sèrie 253 de Renfe. Les dimensions de la locomotora de mercaderies són de 18,9 m de longitud, amb 2,977 m d'amplada i 4,225 m d'alçada.



Fig. 6.1. Tren de la sèrie 253 de Renfe. Font: Wikimedia.



Es realitzaran simulacions de la locomotora per si sola, amb un vagó i amb dos vagons. Els vagons que s'han realitzat són contenidors de càrrega. Les dimensions d'aquest són 2,6 m d'ample i d'alçada i 12 m de longitud.

6.3.2. Models que es faran servir

Tal com s'ha comentat anteriorment es partirà d'un model de tren de mercaderies existent a la realitat. Es tracta de la locomotora elèctrica de la sèrie 253 de Renfe. El disseny realitzat amb el programa SolidWorks, locomotora i amb dos contenidors, es pot veure a les figures 6.2 i 6.3 respectivament.

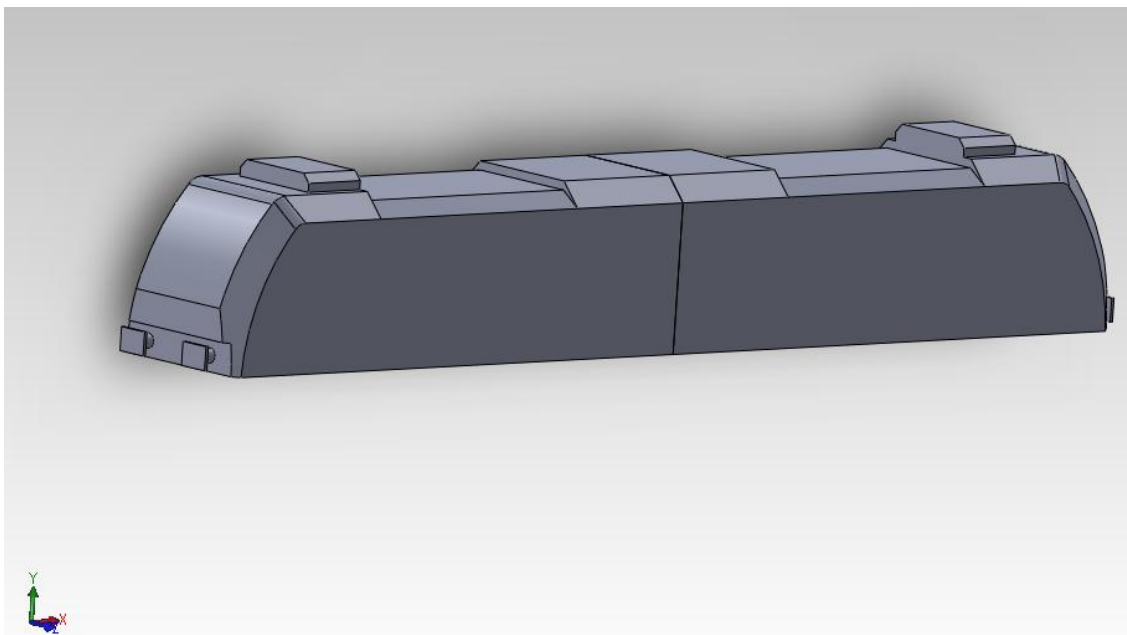


Fig. 6.2. Model 253 de Renfe. Font: SolidWorks.

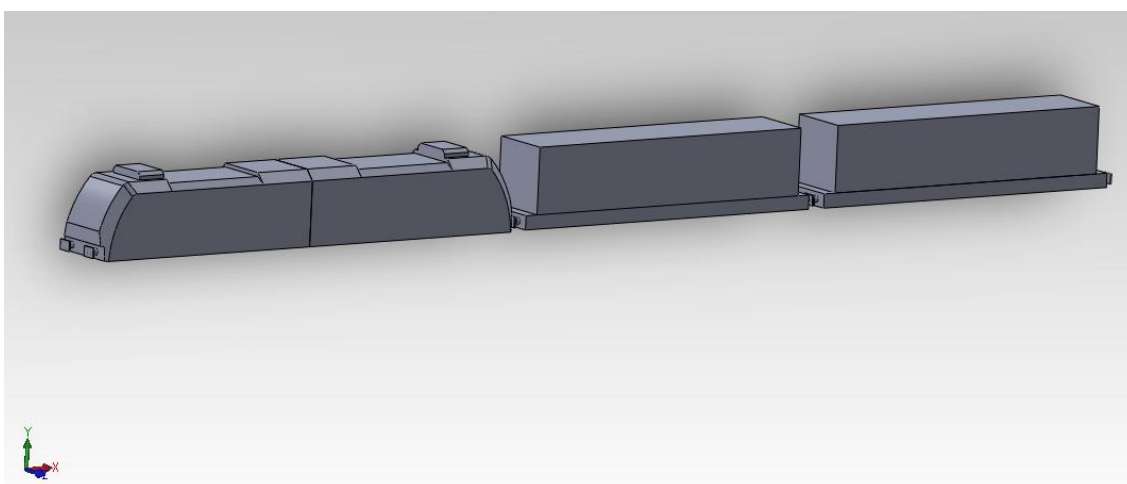


Fig. 6.3. Model 253 de Renfe amb dos contenidors. Font: SolidWorks.

Per realitzar les successives transformacions es partirà del model original de la sèrie 253 de Renfe i mitjançant canvis en la seva geometria davantera, partint de les línies que millor es poden adaptar a un flux d'aire incident, s'obtidran varis models, a priori, millorats de forma aerodinàmica. Algunes d'aquestes estaran basades en models de trens que existeixen a l'actualitat. Un cop realitzades les diverses geometries es procedirà a simular-les per corroborar la viabilitat de les mateixes.

En primer lloc, es realitzarà un model amb una davantera similar a la locomotora de Renfe sèrie 112. Les seves línies aerodinàmiques recorden a la forma de bec d'ànec, com es pot apreciar a la Fig. 6.4.



Fig. 6.4.Locomotora S-112 de Renfe. Font: Flickr.

A partir del cos del model del tren de mercaderies s'ha dissenyat una nova locomotora incorporant les línies i la peculiar forma d'aquesta geometria. La geometria no és exactament calcada a la de la sèrie 112, però és força similar i donarà una idea de les possibles millores aerodinàmiques. El disseny realitzat es pot apreciar a la Fig. 6.5.

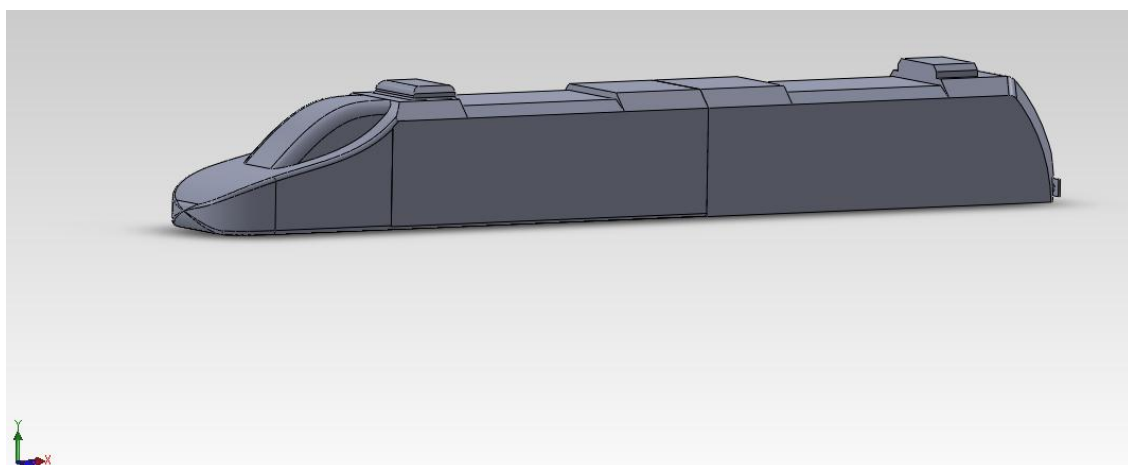


Fig. 6.5.Model 112 d'AVE. Font: Solidworks.



En segon lloc, s'ha realitzat un altre model. En aquest cas també s'ha partit d'una locomotora vigent actualment. El tren que s'ha pres com a referència és el tren Shinkansen A-300. A la Fig. 6.6 es pot veure una imatge on s'aprecia la seva geometria. És un tren d'alta velocitat nipó emprat per a dur a terme serveis amb força rapidesa, podent desplaçar-se a velocitats properes als 270 km/h.



Fig. 6.6.Locomotora Shinkansen A-300. Font: Taringa.

Es procedeix de la mateixa manera que en el disseny de l'anterior model, i es copien les línies del Shinkansen, adaptant-les al tren de mercaderies. El resultat obtingut es mostra a la Fig. 6.7.

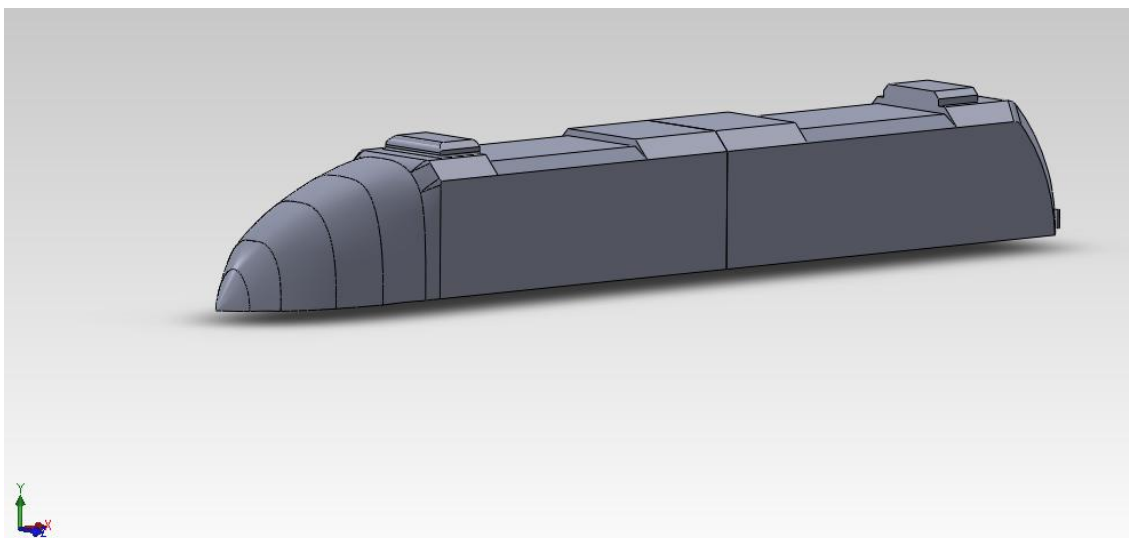


Fig. 6.7. Model Shinkansen A-300. Font: SolidWorks.

En aquest cas es dissenya un nou model aprofitant l'anterior geometria. S'opta per modificar l'entrevagó. El disseny intenta acoblar la locomotora amb el contenidor més proper. D'aquesta

manera es minimitza l'efecte de turbulència en aquesta zona i es garanteix la continuïtat de flux al llarg de tot el tren. El nou disseny es mostra a la figura següent.

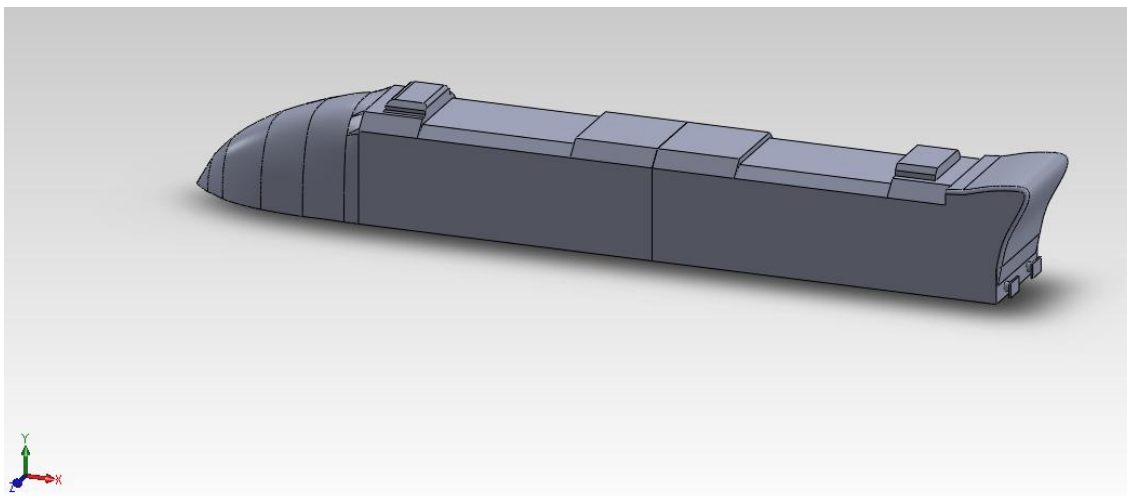


Fig. 6.8. Model Shinkansen amb cua modificada. Font: SolidWorks.

L'últim disseny realitzat no ha estat inspirat en cap locomotora existent. El model s'ha creat partint de les premisses aerodinàmiques mantenint formes ondulades i contínues. S'ha intentat evitar angles que empitjorin la penetrabilitat a l'aire i s'han arrodonit les vores laterals per minimitzar l'existència d'angles rectes. A continuació es mostra el disseny obtingut.

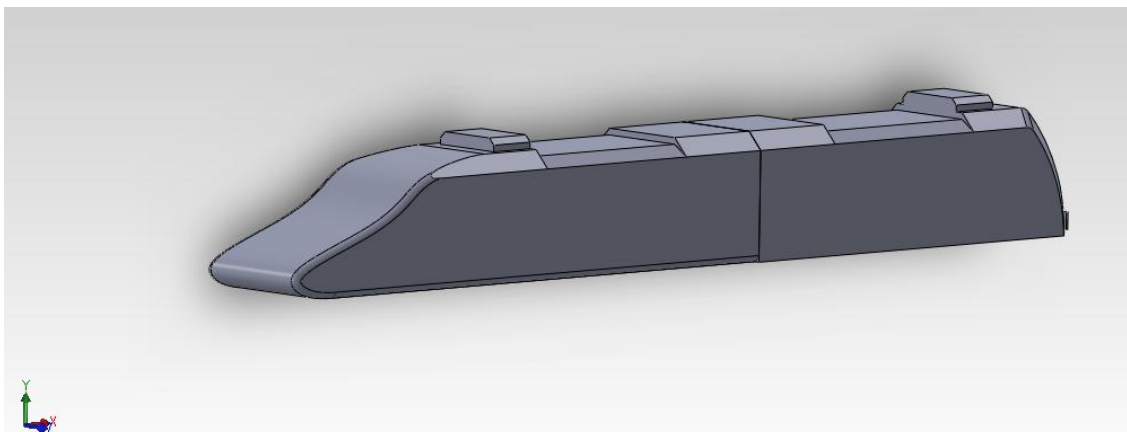


Fig. 6.9. Model Propi. Font: SolidWorks.

6.4. Simulacions 3D

Es realitzaran simulacions del tren original i de les successives modificacions amb model dissenyats en 3D amb la versió estudiantil del programa SolidWorks. Aquest és un programa de disseny assistit per ordinador per modelatge mecànic. El programa permet modelar peces i conjunts i extreure'n tant plans com altre informació necessària per a la producció. És un programa que funciona en base a les noves tècniques de modelatge amb sistemes CAD.



A l'hora de realitzar el disseny, tant del model de tren de mercaderies com els possibles models millorats, no es modelaran els *bogies* del tren perquè aquests impliquen geometries força petites que repercutirien en el mallat i en la complexitat de la simulació. D'aquesta manera, tots els dissenys seran realitzats sense aquesta part permetent la comparació entre simulacions.

6.4.1. Procés per realitzar la simulació

El procediment per dur a terme les simulacions es realitzarà emprant el model del tren original sense cap vagó. Els passos que a continuació s'explicaran són els mateixos per fer totes les simulacions.

El programa COMSOL ofereix la possibilitat de realitzar tot tipus de simulacions en una, dues i tres dimensions. En aquest cas es farà una simulació en 3D.

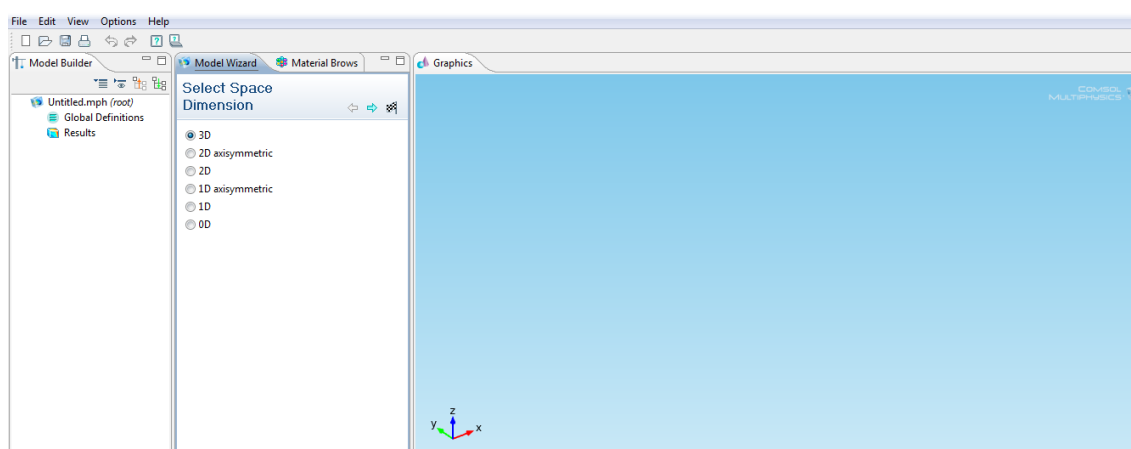


Fig. 6.10. Selecció de l'espai dimensional. Font: COMSOL Multiphysics.

De les diferents opcions que ens facilita el programa, se selecciona flux turbulent model k-ε.

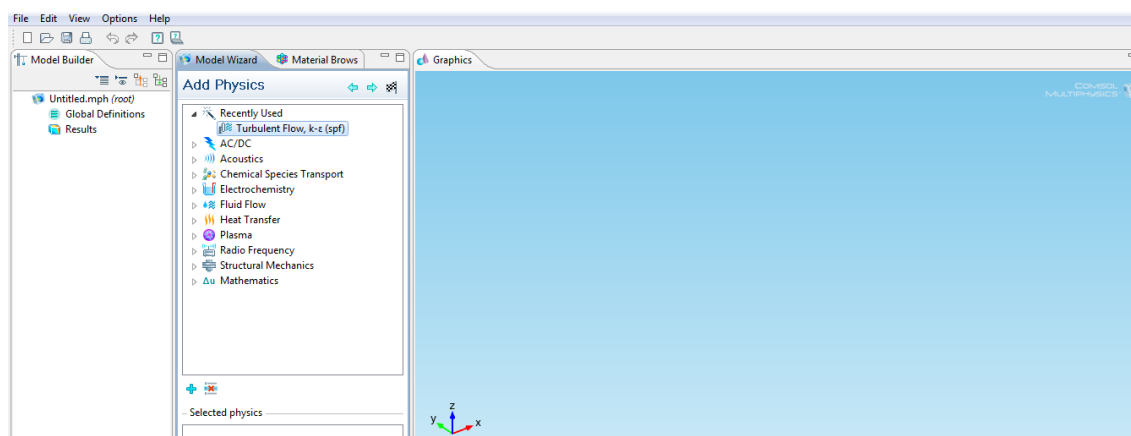


Fig. 6.11. Tria de la física flux turbulent k-ε. Font: COMSOL Multiphysics.

Les diferents simulacions que es realitzaran seran a velocitat constant. És per aquest motiu que es tria un estudi estacionari, i no pas transitori.

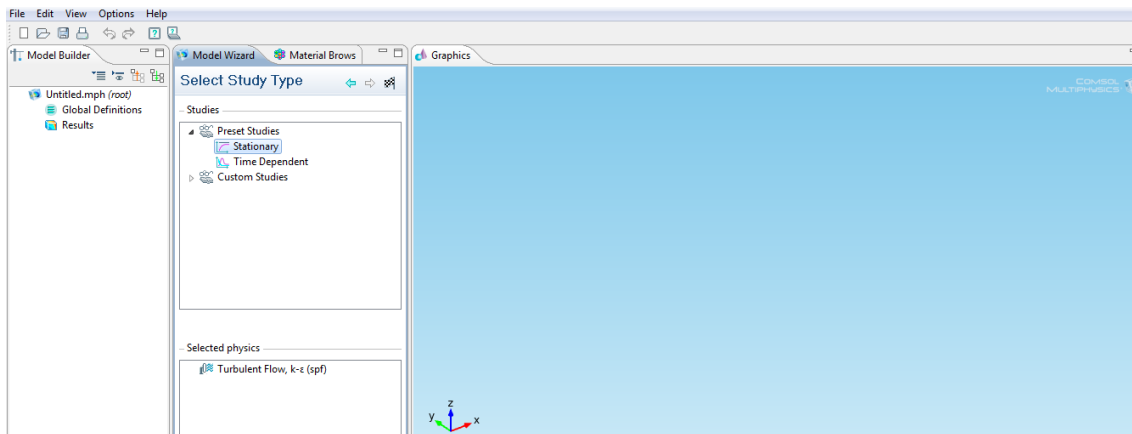


Fig. 6.12. Selecció del tipus d'estudi. Font: COMSOL Multiphysics.

Com s'ha comentat anteriorment les geometries seran importades del programa de disseny industrial SolidWorks, tot i que el COMSOL també ofereix l'opció de realitzar el disseny de la geometria.

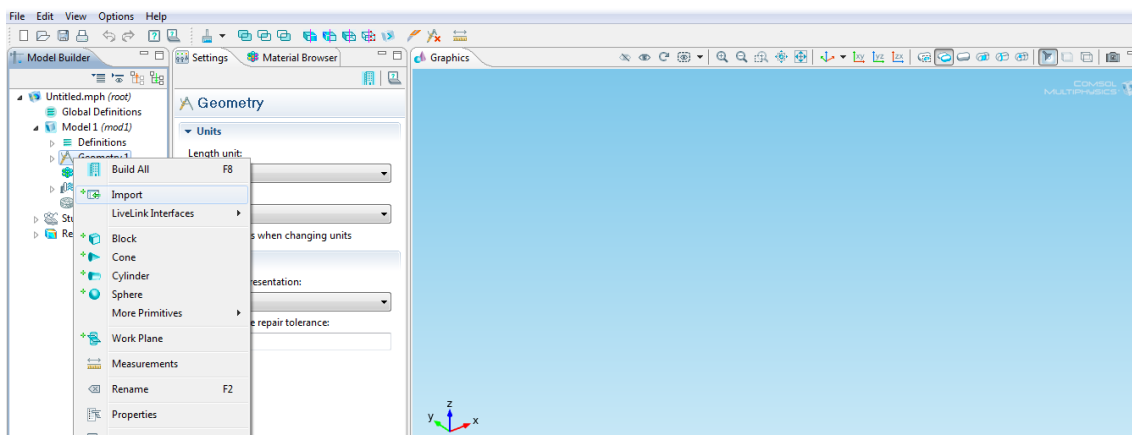


Fig. 6.13. Importació de l'arxiu realitzat a SolidWorks. Font: COMSOL Multiphysics.



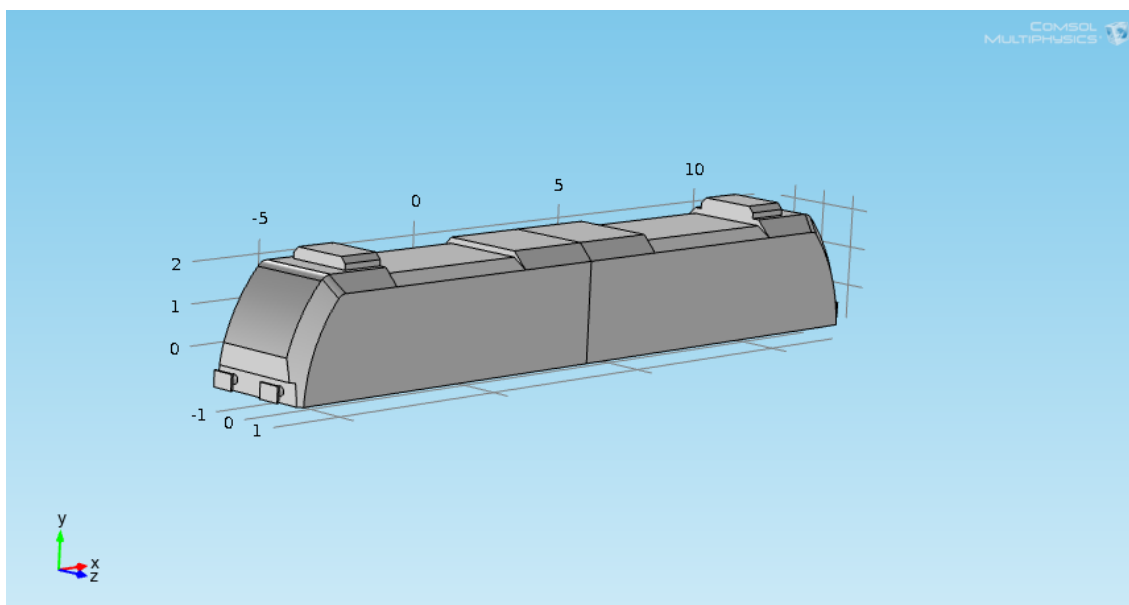


Fig. 6.14. Model del tren original. Font: COMSOL Multiphysics.

A continuació es procedeix a crear el volum de control de la pròpia simulació. Primerament es crea un pla de treball situat a l'eix y-z a una distància suficient de la part davantera de la locomotora. En aquest pla es crea un recinte rectangular i centrat de 16 m de base i 12 m d'alçada que serà la cara frontal del volum de control.

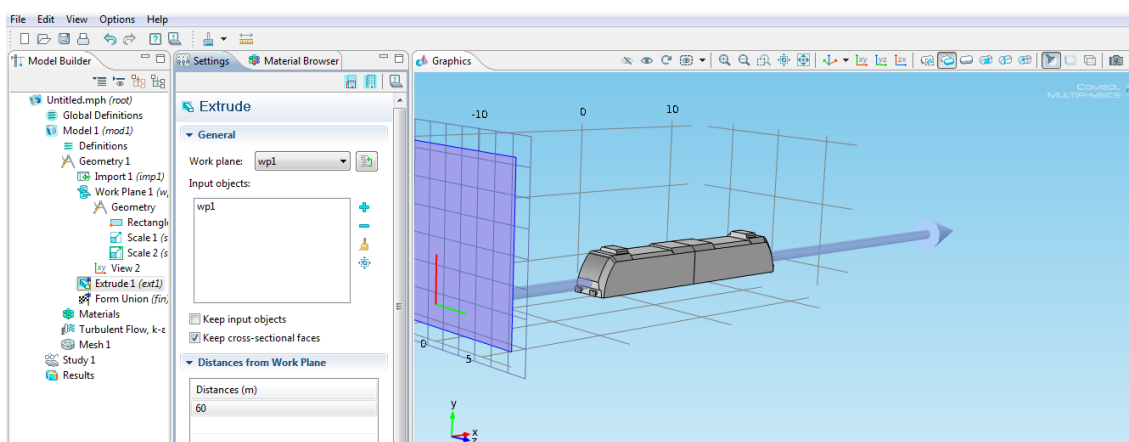


Fig. 6.15. Creació del pla de treball del volum de control. Font: COMSOL Multiphysics.

El següent pas és extrudir la base del volum de control. En el cas que s'està tractant, model amb únicament la locomotora sense vagons, l'extrusió serà de 60 metres de profunditat en la direcció x. En les altres simulacions on s'estudien models amb un i dos vagons, el procediment serà el mateix però amb extrusions de 90 i 120 metres respectivament.

El programa permet fer l'estudi de l'aire que envolta el contorn que es vol estudiar. Es per aquest motiu que se selecciona l'opció "difference", on l'ortoeidre serà l'objecte a afegir i la locomotora l'objecte a sostraire.

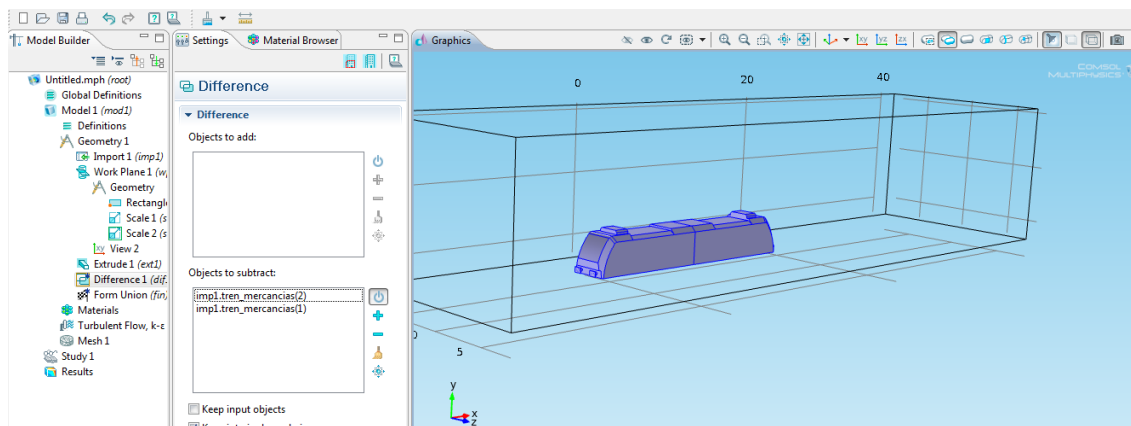


Fig. 6.16. Volum de control. Font: COMSOL Multiphysics.

El següent pas és triar el material i les propietats del mateix. S'escull l'opció "air" on s'inclouen per defecte totes les propietats de l'aire.

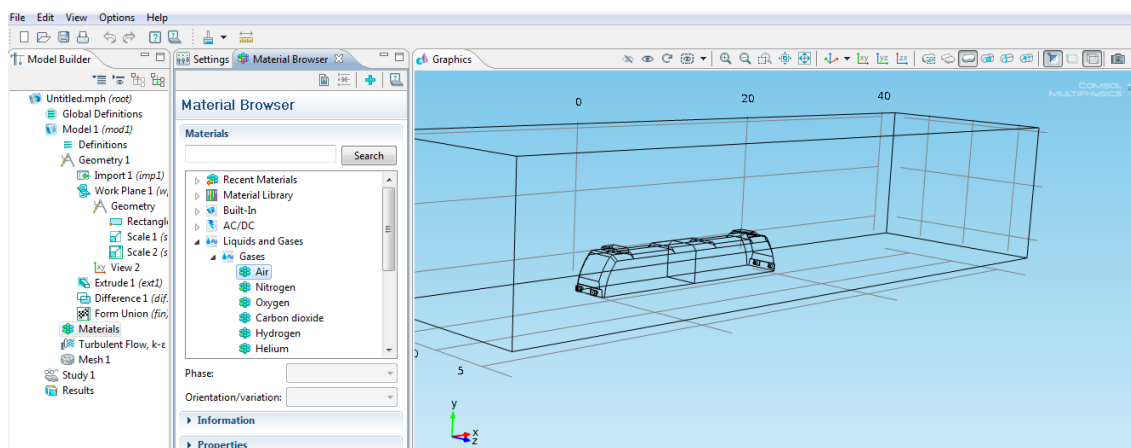


Fig. 6.17. Tria del material. Font: COMSOL Multiphysics.

S'han d'imposar les condicions de contorn referents al volum de control. La cara de davant s'interpreta com a cara d'entrada de flux d'aire i se li incorpora una velocitat d'entrada de 44 m/s (aproximadament uns 160 km/h). Com a sortida de flux s'assigna la cara de darrera. Tant les cares laterals com la superior se'ls ha d'imposar la condició de simetria, fet que garanteix que a l'altra banda de la cara, fora del volum de control, també hi ha aire.



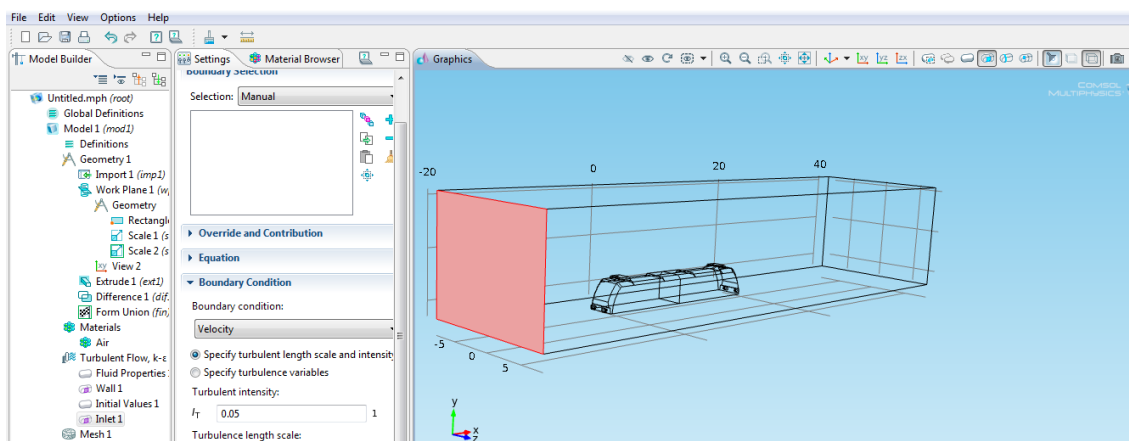


Fig. 6.18. Imposició de les condicions de contorn. Font: COMSOL Multiphysics.

Únicament manca realitzar el mallat del volum de control. Es un procediment força trivial, ja que es el mateix programa l'encarregat de dissenyar-lo. S'escull la forma de l'element, en aquest cas tetraèdric, i la mida del mateix, extremadament gros. S'ha d'indicar també que la malla ha d'estar dissenyada per dinàmica de fluids.

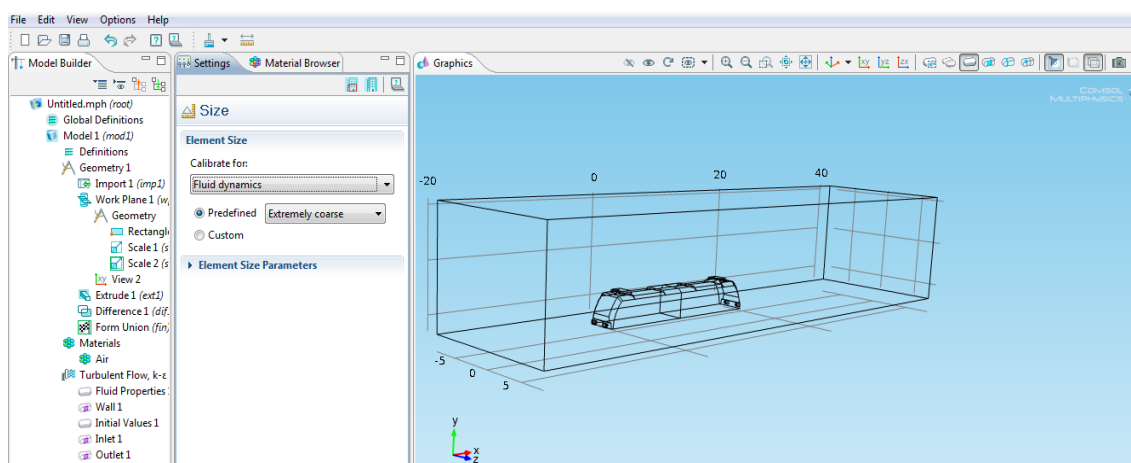


Fig. 6.19. Dimensions de l'element. Font: COMSOL Multiphysics.

A la figura 6.20 es pot veure la malla final realitzada pel COMSOL. El tetraedre més petit és de 0,922m de costat i el més gran de 4,35m de costat. Els elements més petits es concentren en les zones estretes, en zones corbades i properes al model.

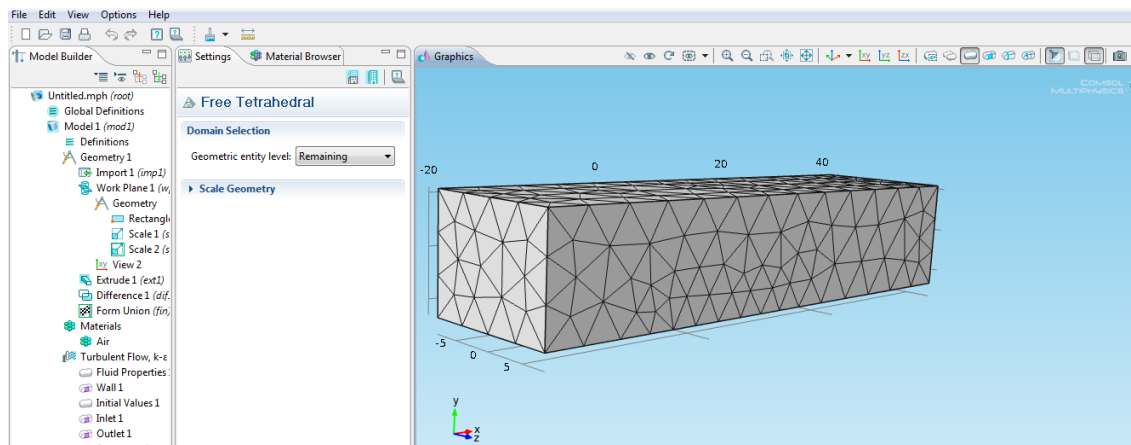


Fig. 6.20. Mallat. Font: COMSOL Multiphysics.

6.4.2. Mètode per extreure els resultats de la simulació

Un cop realitzades totes les simulacions dels models presentats anteriorment es procedeix a explicar la metodologia d'extracció de resultat de les mateixes. A l'hora de determinar la millora d'un model dissenyat respecte del tren de partida, el de mercaderies, es necessita obtenir de cada model un paràmetre que doni una idea fiable de l'aerodinàmica obtinguda. Aquest determinarà el grau de millora de cada model. El paràmetre necessari per dur a terme la comparació entre models és la força de resistència a l'avanç, expressada en newtons. El software permet obtenir aquesta dada mitjançant el procés que es mostrarà a continuació.

Primerament s'obre la pestanya de *Derived values* i s'ha de clicar l'opció *Integration* i dintre d'aquesta *Surface Integration*. Es pretén realitzar una integració superficial de totes les cares del tren.

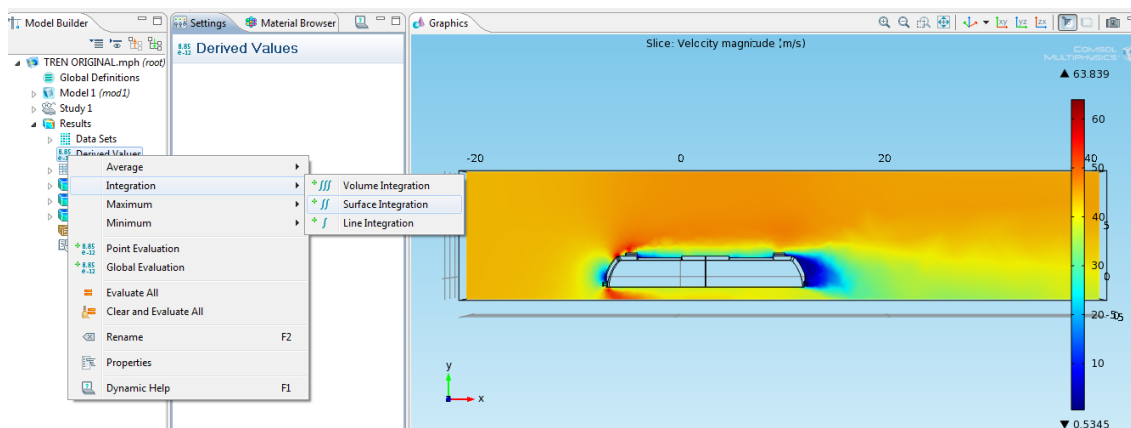


Fig. 6.21. Integral de la pressió. Font: COMSOL Multiphysics.

A continuació s'han de seleccionar totes les superfícies del model del tren seleccionat. La força de resistència a l'avanç té la direcció de l'eix x. S'escull l'opció *Turbulent Flow, k-ε, Normal vector, Normal vector x component*.



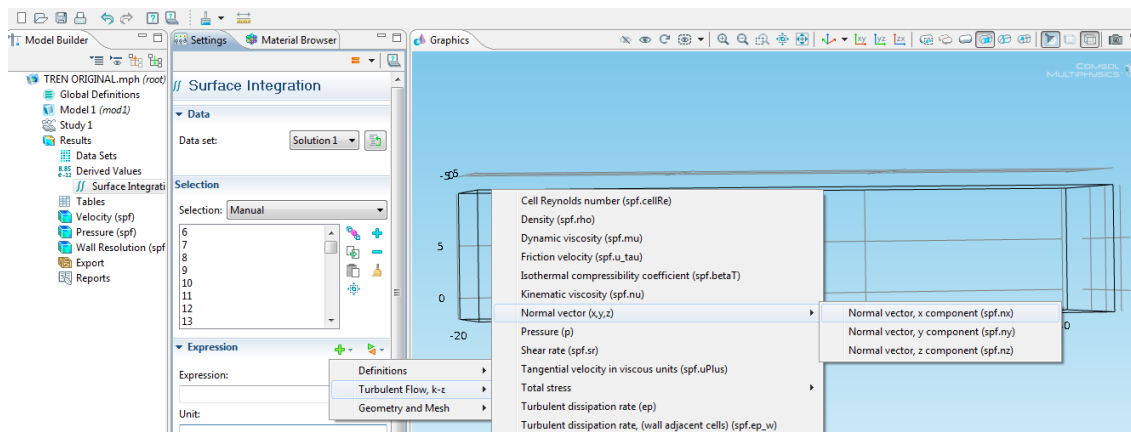


Fig. 6.22. Tria de les expressions pel càlcul de la força. Font: COMSOL Multiphysics.

L'expressió que es vol fer servir és la pressió a la que es veu sotmès tot el tren, però descomposta a l'eix x, per tal de garantir que la força obtinguda va en aquesta mateixa direcció.

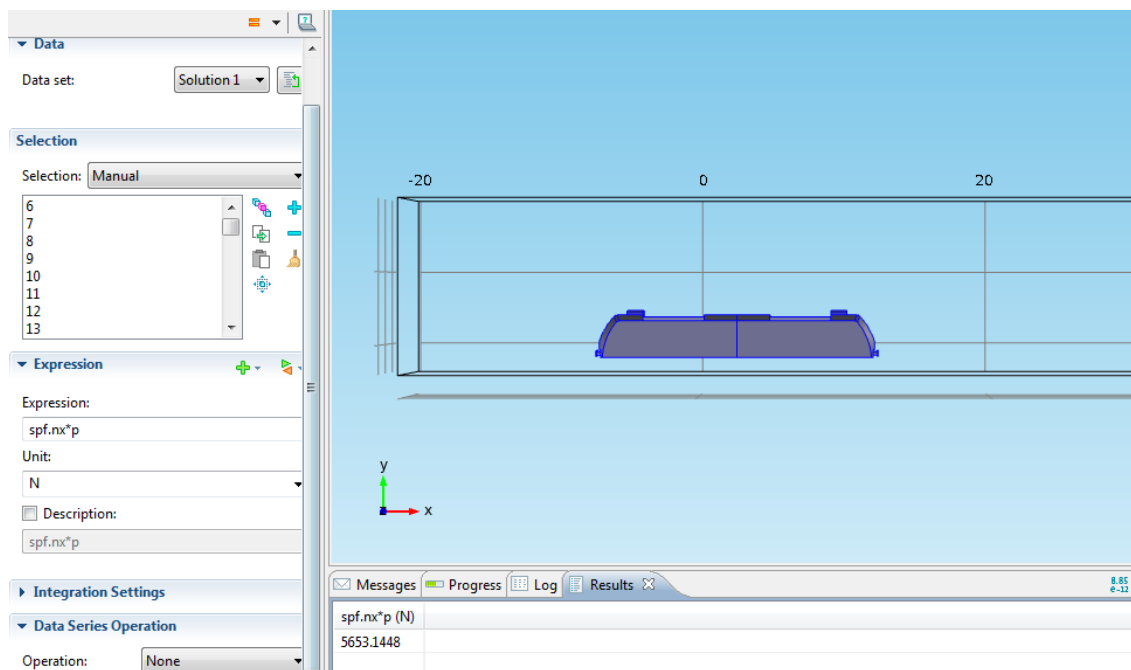


Fig. 6.23. Càlcul de la força de resistència a l'avanç. Font: COMSOL Multiphysics.

Finalment el COMSOL realitza el càlcul desitjat. S'obté una força de resistència a l'avanç de 5653,14 N aproximadament.

Aquesta metodologia s'ha d'aplicar a tots els models dels trens dissenyats tant de la locomotora per si sola, com també amb un vagó i dos vagons.

6.5. Resultats de les simulacions

En aquest capítol apareixen totes les simulacions dels diferents models. Un cop realitzades s'extraurà la força de resistència a l'avanç relacionada amb la pressió, així doncs, es podrà comparar l'aerodinàmica de cada tren.

Per donar validesa a les simulacions i als resultats que esdevenen, es tindrà en compte que el gràfic de pressions ha de correspondre amb el valor de la pressió dinàmica que crea l'aire en els punts d'estancament. És a dir, on la velocitat és zero la pressió del gràfic ha de ser igual a la pressió dinàmica.

Aquests resultats fan referència a simulacions realitzades a una velocitat d'aire de 44 m/s, aproximadament 160 km/h. A l'annex B s'incorporen les mateixes simulacions realitzades a una velocitat d'aire incident de 55 m/s, uns 200 km/h.

6.5.1. Model 1: Tren de mercaderies

En un principi s'ha simulat el model de tren de mercaderies original on posteriorment s'inclouran les diferents modificacions. D'aquest model s'han extret les diferents gràfiques de pressió i velocitat, repetint les simulacions amb diferent nombre de vagons.

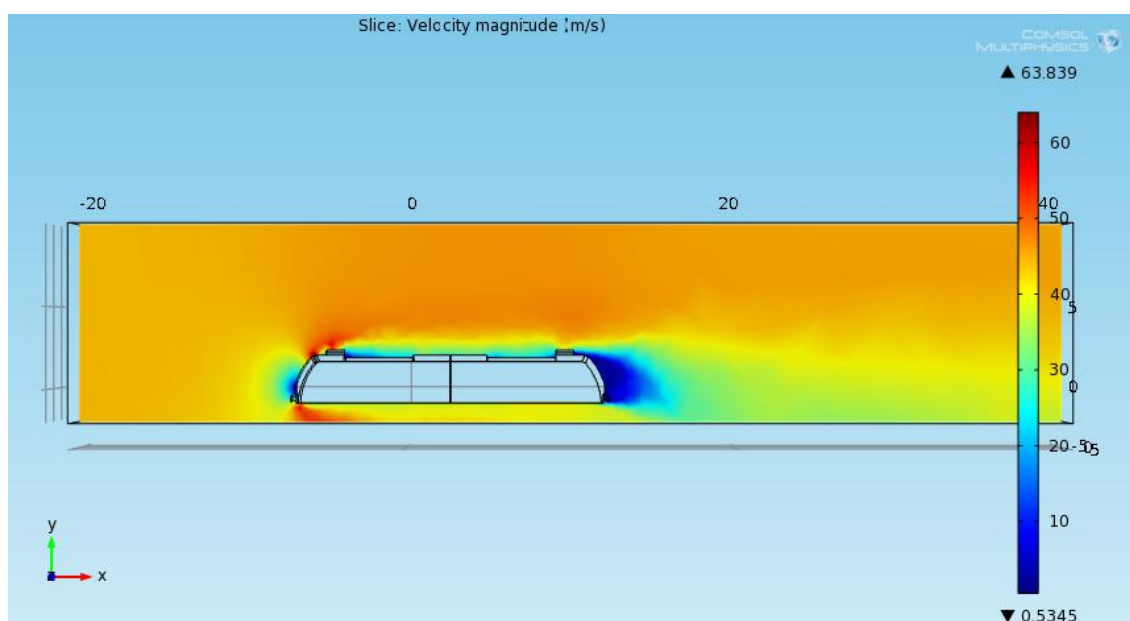


Fig. 6.24. Velocitat del tren de mercaderies. Font: COMSOL Multiphysics.

A la Fig. 6.24 es pot veure la velocitat del flux d'aire al voltant del tren. Les zones on el vent xoca directament amb el tren la velocitat disminueix, en alguns punts fins i tot és gairebé nul·la. Aquests són els punts d'estancament, aquí trobarem la màxima pressió. En canvi a la part de darrera la velocitat



també és mínima i no hi ha pressió, això es degut a que el tren tapa el flux d'aire en aquesta zona. Es pot comprovar mirant conjuntament la figura anterior amb la Fig.6.25, el gràfic de pressions.

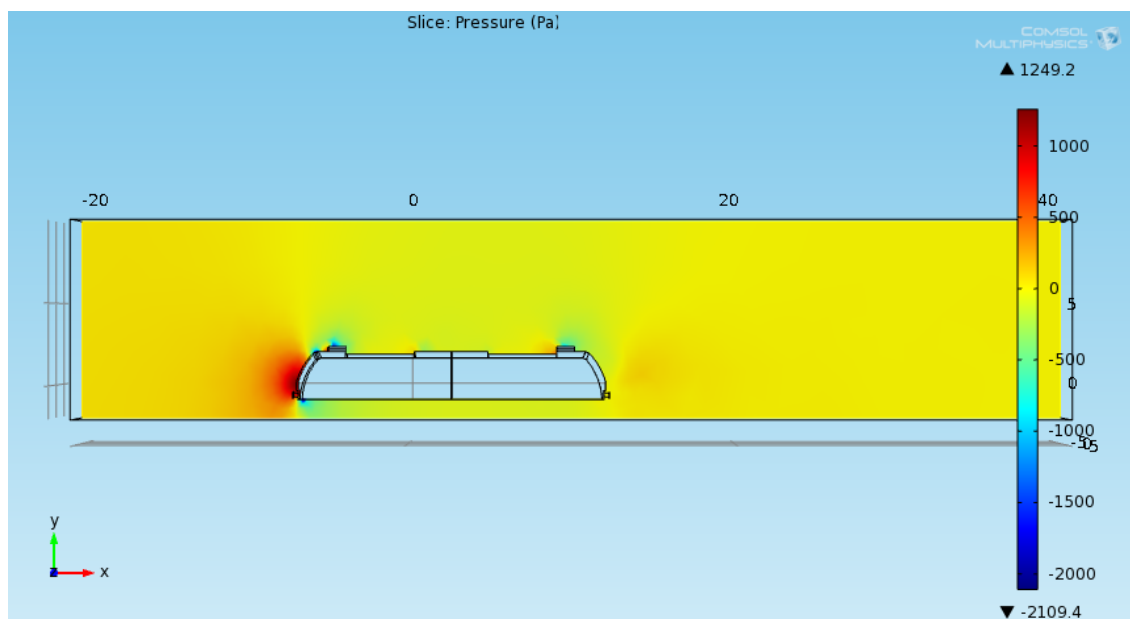


Fig. 6.25. Pressions del tren de mercaderies. Font: COMSOL Multiphysics.

Al gràfic de pressions, a la Fig.6.25, es pot veure a més a més de l'exposat anteriorment, zones de pressions negatives. Aquestes zones de succió són degudes a les formes agressives que tenen les entrades d'aire. Les entrades d'aire per si soles ja creen un tipus de resistència a l'avanç, però la forma en que estan dissenyades trenquen amb la configuració aerodinàmica del tren. Això crea forts canvis de direcció del flux i grans succions d'aire.

Per determinar la validesa de l'ordre de magnitud dels resultats s'ha realitzat un petit càlcul. La pressió dinàmica en els punts d'estancament definirà la bondat dels resultats.

$$P_{din} = \frac{1}{2} \rho V^2$$

(Eq.6.1)

On:

- P_{din} és la pressió al punt d'estancament ($v=0$) en Pa.
- ρ és la densitat de l'aire $1,2 \text{ kg/m}^3$.
- V és la velocitat del fluid 44 m/s .

Fent el càlcul s'ha comprovat que el valor del càlcul coincideix amb el valor màxim de pressió en el gràfic (1249 Pa).

A la Fig.6.26, on apareix el tren de mercaderies amb un vagó, es pot veure una distribució de velocitats semblant a l'anterior, l'única diferència és el forat que hi ha entre la màquina i el vagó, l'entre-vagó. Aquest forat està resguardat del flux d'aire incident, així que la velocitat és molt baixa i les pressions són quasi nul·les.

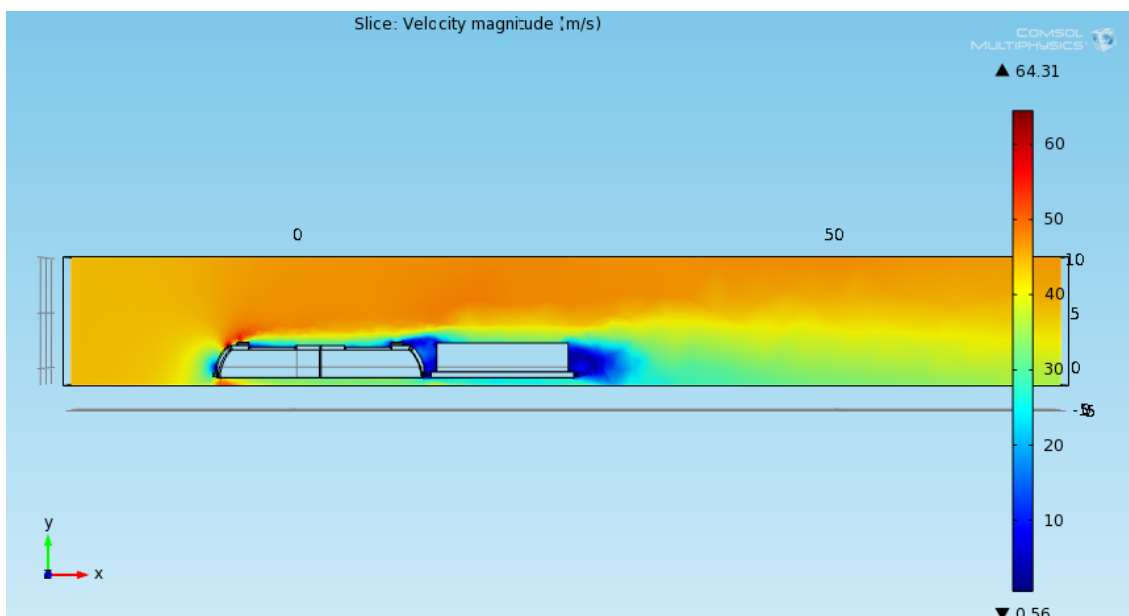


Fig. 6.26. Velocitats del tren de mercaderies amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

A la Fig.6.27 de pressions, es mostra que a la part superior del vagó sí que apareixen pressions negatives, això ve relacionat amb les turbulències del forat i la forma poc aerodinàmica dels contenidors que carreguen els vagons.



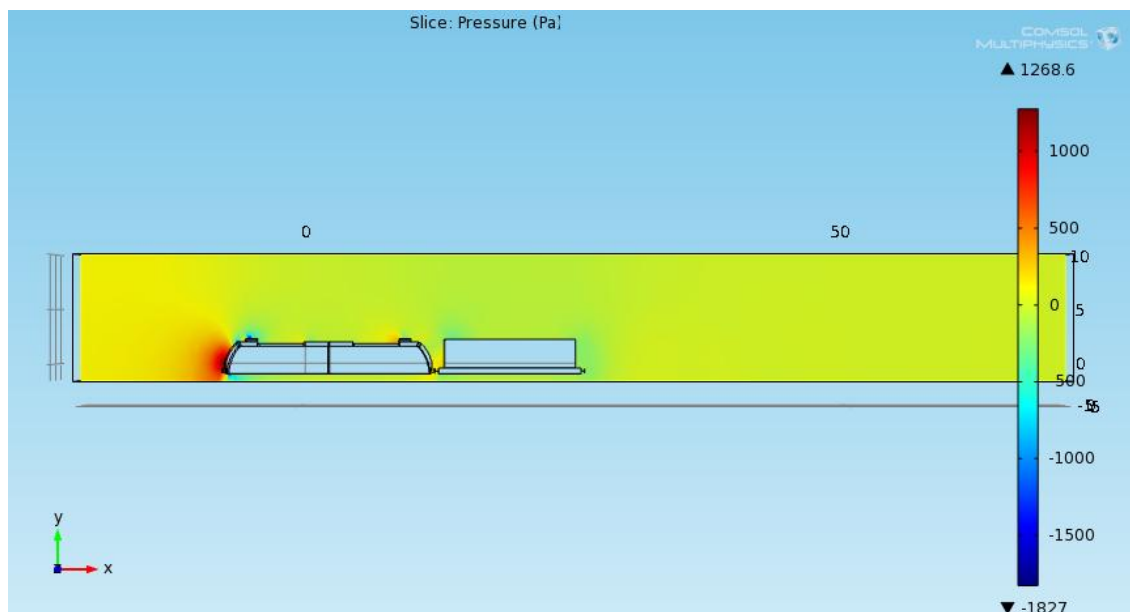


Fig. 6.27. Pressions del tren de mercaderies amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

A les figures següents Fig. 6.28 i Fig.6.29 es veu una distribució de velocitats i pressions semblant als casos anteriors amb la diferència del nou forat entre vagons. Aquest forat té velocitats baixes i pressions nul·les.

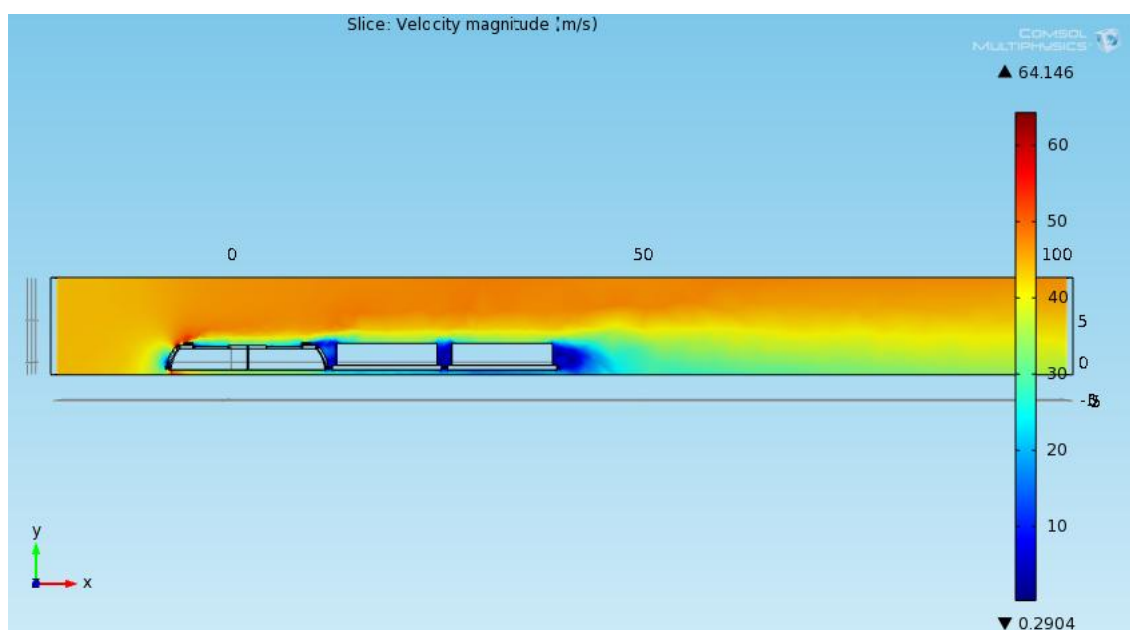


Fig. 6.28. Velocitats del tren de mercaderies amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

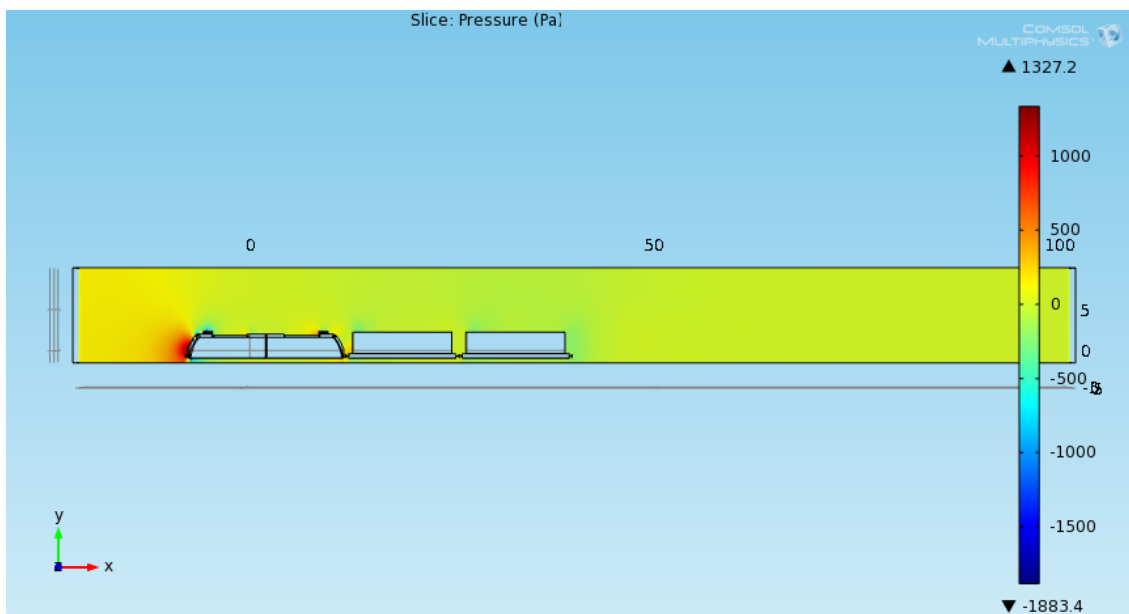


Fig. 6.29. Pressions del tren de mercaderies amb dos vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

Un cop finalitzada la simulació i extrets els resultats de pressió i velocitat, es procedeix a fer els càlculs de la força de resistència aerodinàmica.

Els càlculs es realitzen mitjançant una funció que integra una variable seleccionada sobre una superfície. Aquesta variable és la pressió, i la superfície són totes les cares del tren. És a dir, que s'integra la pressió sobre tota la superfície del tren. Però aquesta dada, tot i tenir unitats de força, no és en la direcció de la velocitat, per tant no és la resistència aerodinàmica a l'avanç. Finalment s'utilitza una eina del programa que dóna la component en l'eix que interessa de la variable de força aconseguida. Ara sí que es poden deduir conclusions.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
F_{resistència}	5.653,14 N	6.402,13 N	6.893,17 N

Taula 6.1. Forces de resistència del tren original. Font: Pròpia.

A partir dels valors de les forces és pot calcular la potència necessària per batre aquesta força.

$$P = \frac{F \times v}{1000}$$

(Eq. 6.1)



On:

- P: Potència expressada en kW
- F: Força de resistència aerodinàmica en N.
- v: Velocitat en m/s

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
P _{necessària}	248,74 kW	281,69 kW	303,30 kW

Taula 6.2. Potència aerodinàmica del tren original. Font: Pròpia.

A partir de les dues taules anteriors i les dels resultats dels altres models podrem extreure les conclusions sobre l'aerodinàmica dels diferents trens de mercaderies.

6.5.2. Model 2: AVE 112

Tot seguit es poden veure les gràfiques de velocitats i pressions del següent model. Degut a que només s'ha canviat la cara del tren, hi ha variacions significatives en les distribucions de les cares frontals respecte el model anterior, la resta és similar.

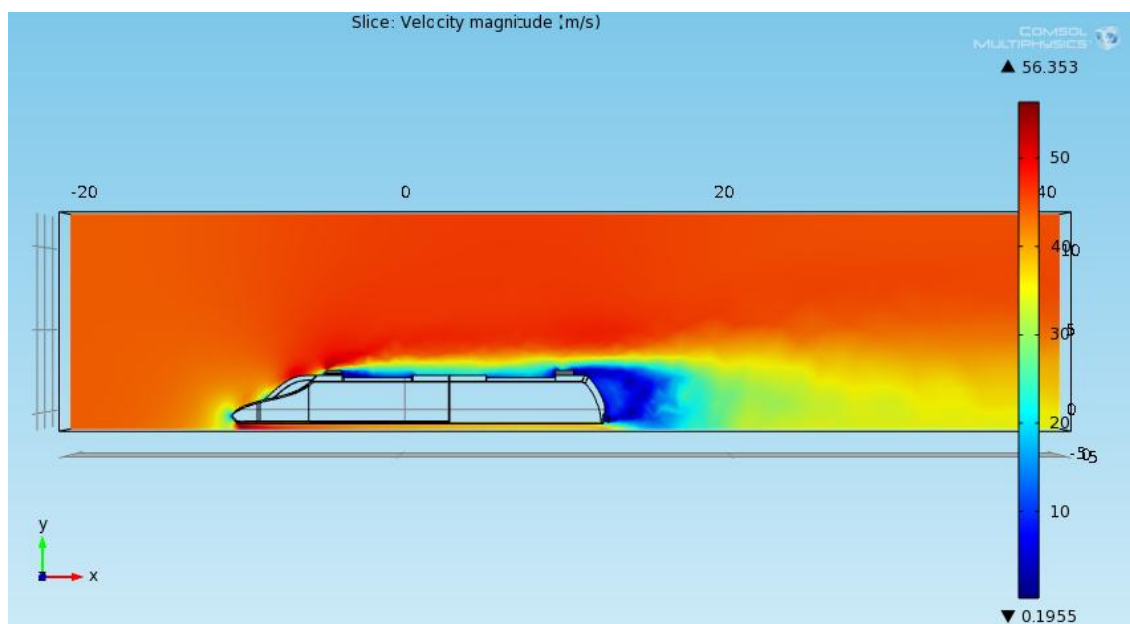


Fig. 6.30. Velocitats de l'AVE 112. Font: COMSOL Multiphysics.

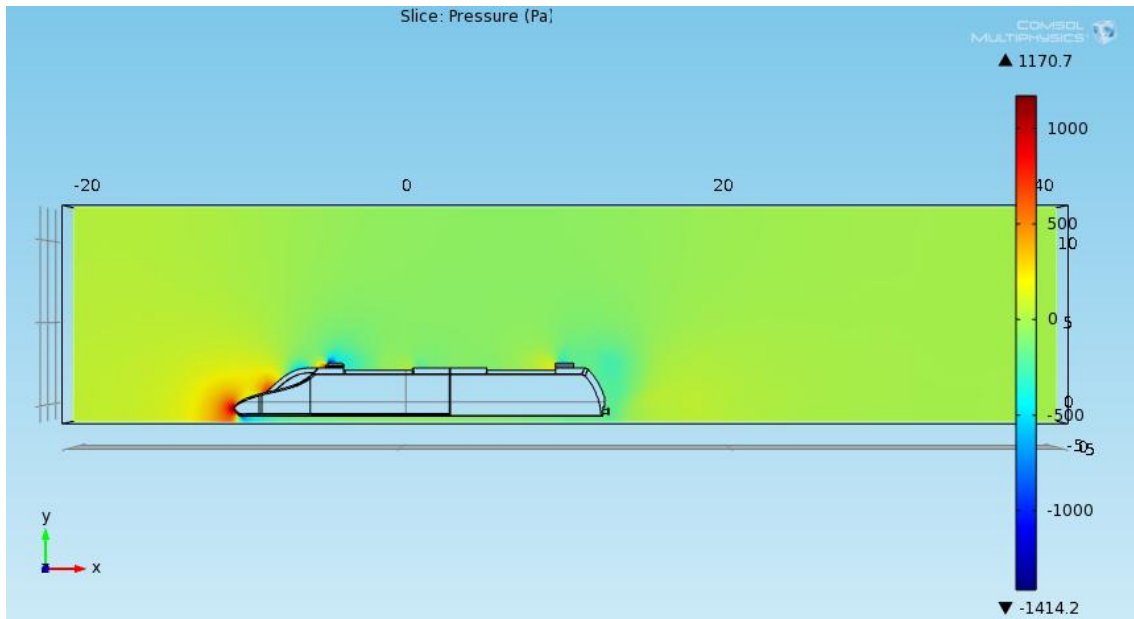


Fig. 6.31. Pressions de l'AVE 112. Font: COMSOL Multiphysics.

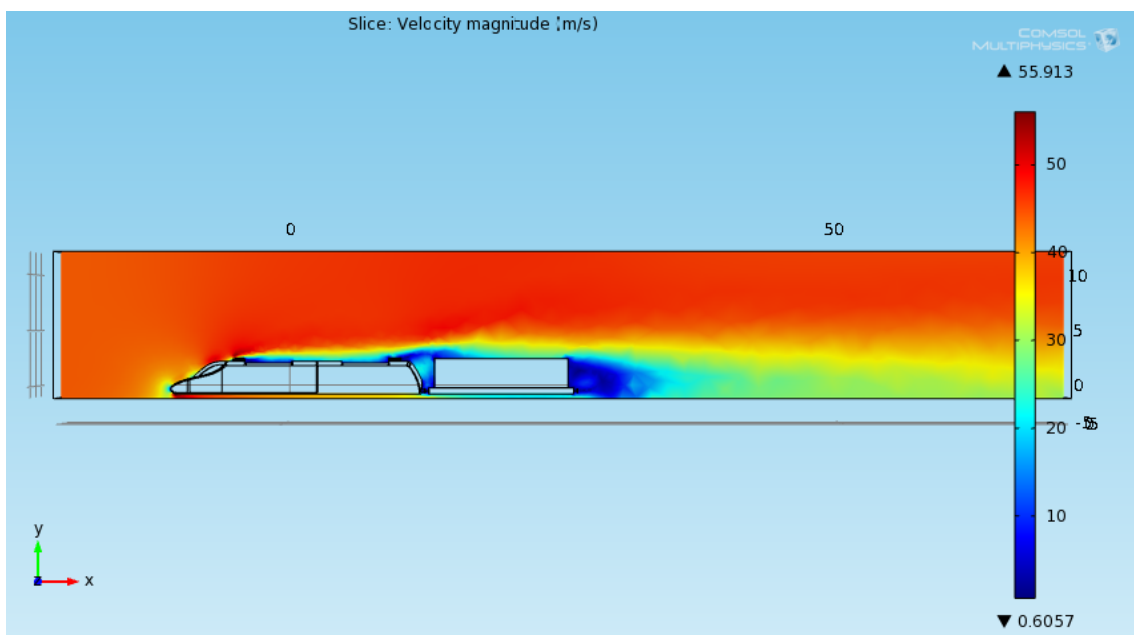


Fig. 6.32. Velocitats de l'AVE 112 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.



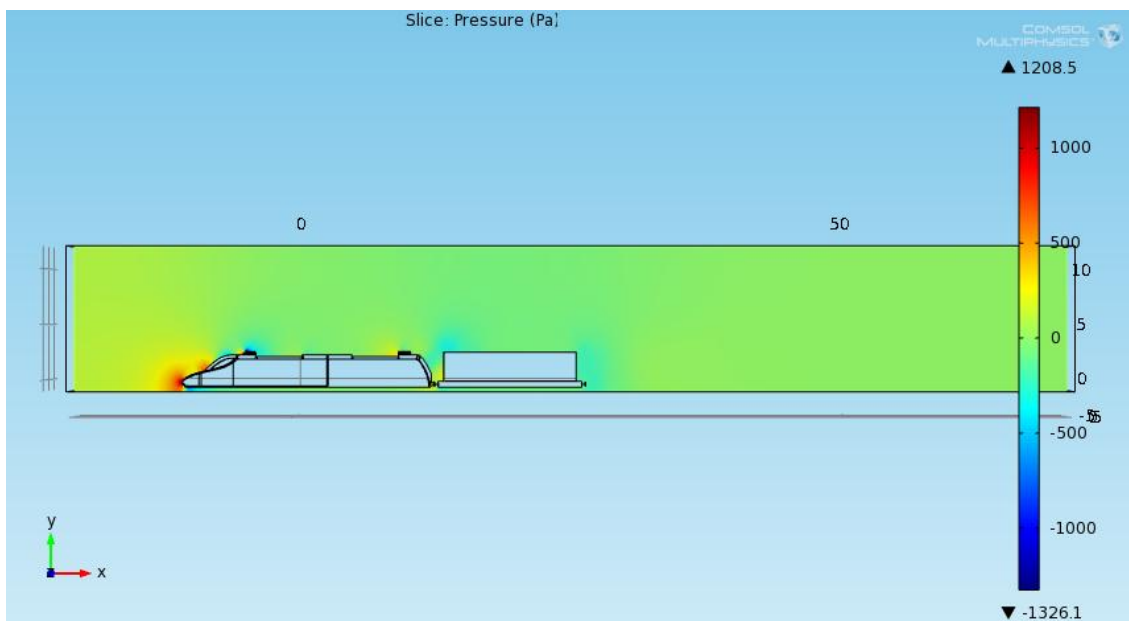


Fig. 6.33. Pressions de l'AVE 112 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

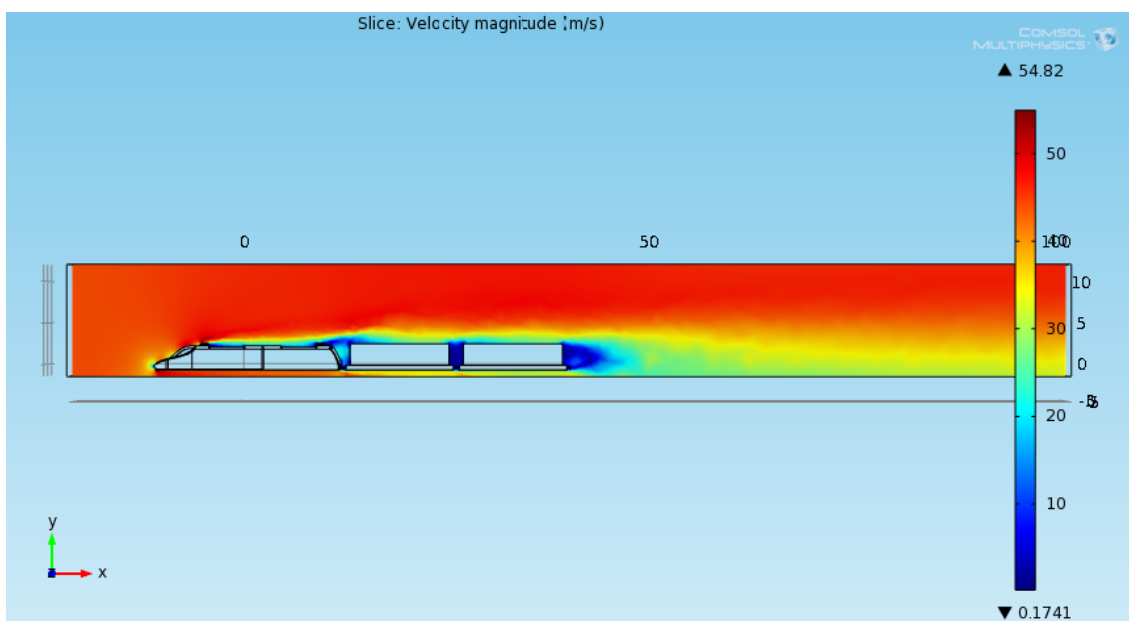


Fig. 6.34. Velocitats de l'AVE 112 amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

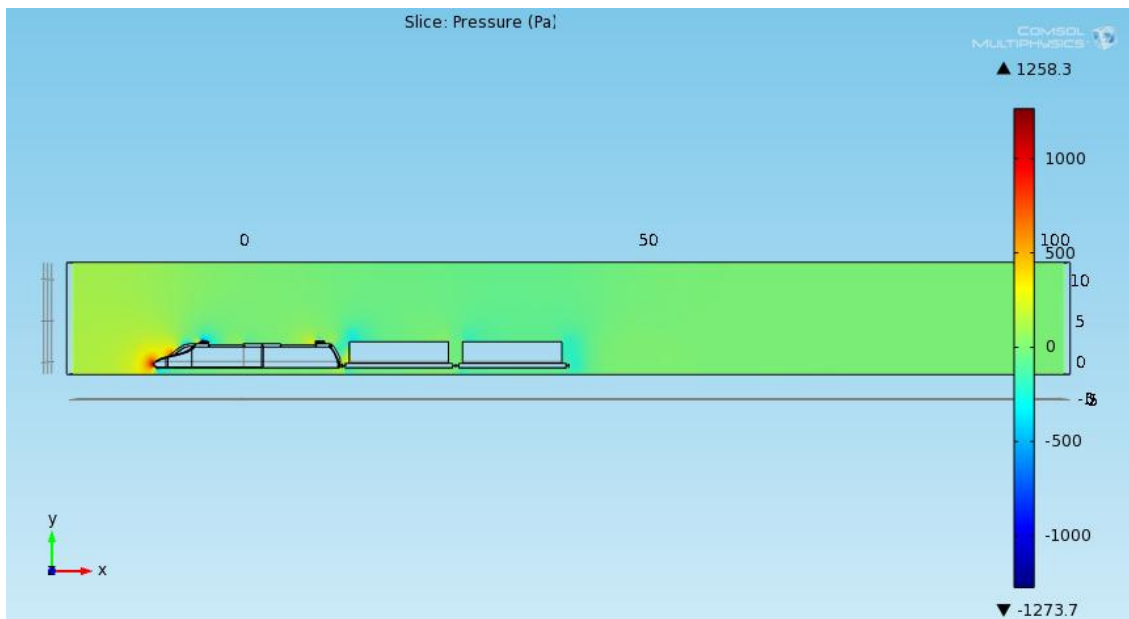


Fig. 6.35. Pressions de l'AVE 112 amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

Anàlogament a l'apartat anterior es realitzen i calculen les dades necessàries per deduir les conclusions.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
$F_{\text{resistència}}$	3788,27 N	4696,7 N	4907,86 N

Taula 6.3. Forces de resistència de l'AVE 112. Font: Pròpia.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
$P_{\text{necessària}}$	166,684 kW	206,655 kW	215,946 kW

Taula 6.4. Potències aerodinàmiques de l'AVE 112. Font: Pròpia.

6.5.3. Model 3: Shinkansen A-300

El següent model també ha estat modificat per la cara frontal respecte el model original, la resta del tren és similar. A continuació es mostren les figures corresponents a la pressió i la velocitat per a aquest disseny.



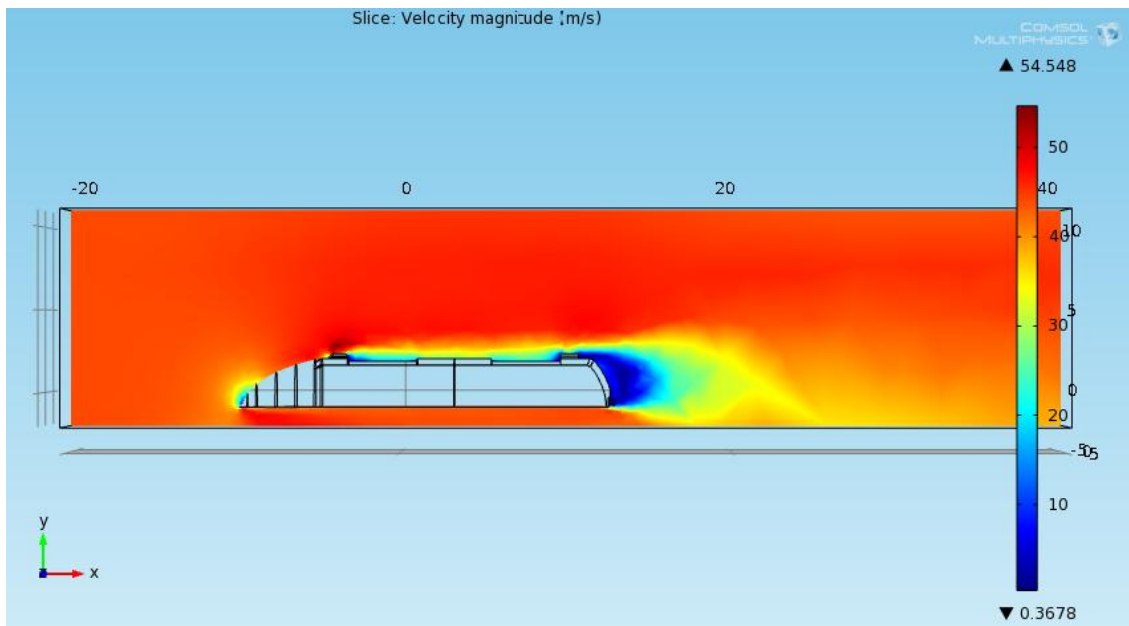


Fig. 6.36. Velocitats del Shinkansen A-300. Font: COMSOL Multiphysics.

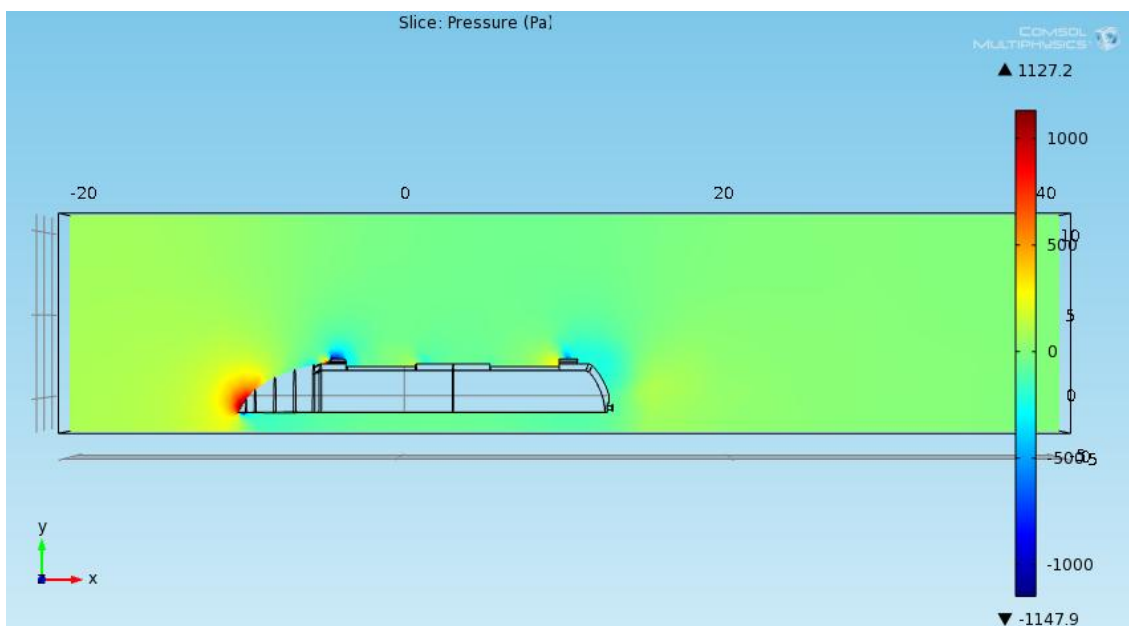


Fig. 6.37. Pressions del Shinkansen A-300. Font: COMSOL Multiphysics.

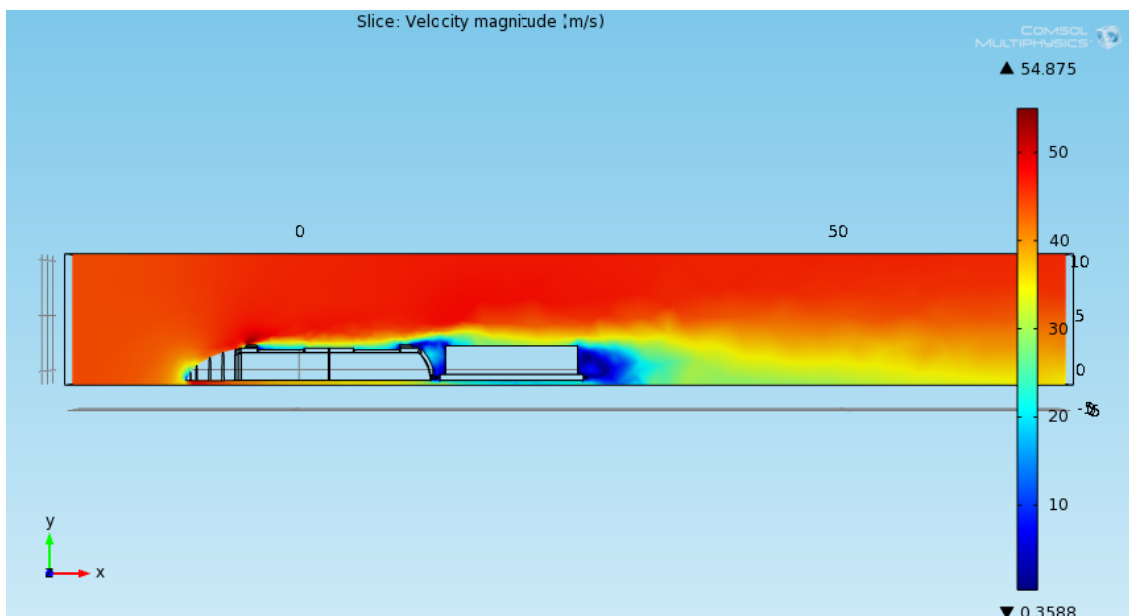


Fig. 6.38. Velocitats del Shinkansen A-300 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

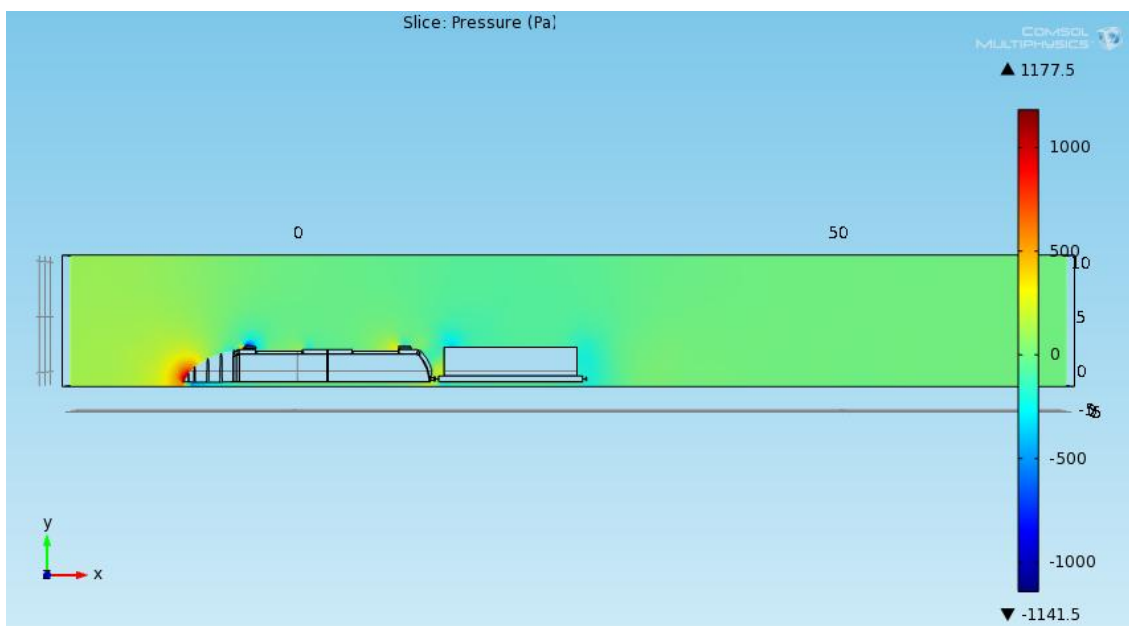


Fig. 6.39. Pressions del Shinkansen A-300 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.



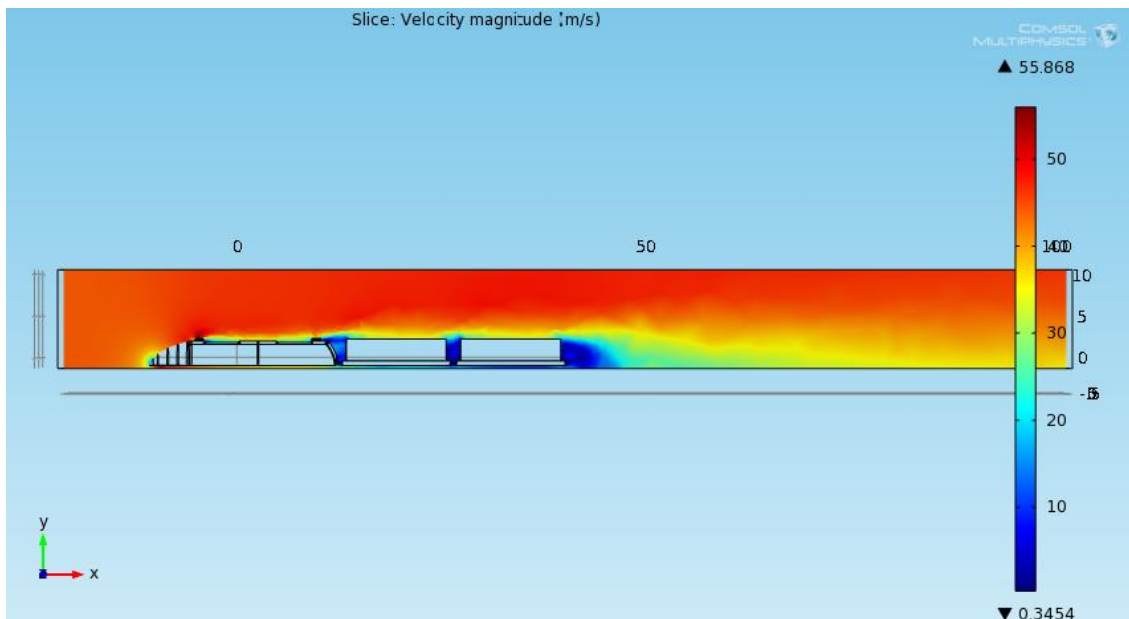


Fig. 6.40. Velocitats del Shinkansen A-300 amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

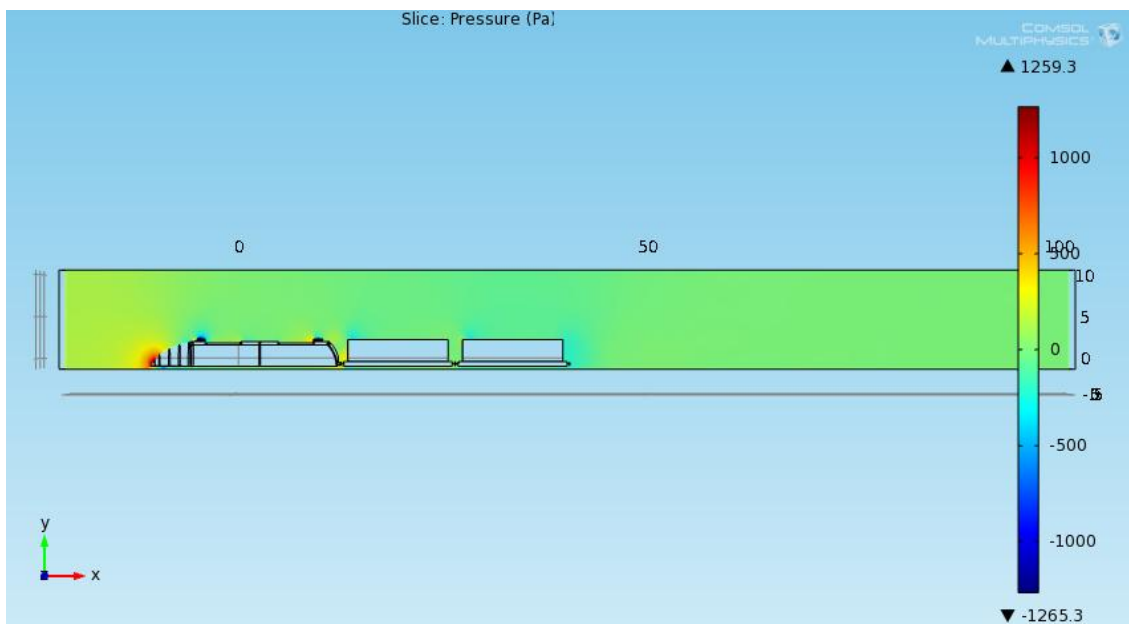


Fig. 6.41. Pressions del Shinkansen A-300 amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
$F_{\text{resistència}}$	3936,98 N	4698,21 N	5338,80 N

Taula 6.5. Forces de resistència del Shinkansen A-300. Font: Pròpia.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
$P_{necessària}$	173,227 kW	206,721 kW	234,907 kW

Taula 6.6. Potències aerodinàmiques del Shinkansen A-300. Font: Pròpia.

6.5.4. Model 4: Shinkansen A-300 amb cua

Aquest model comparteix la mateixa cara que l'anterior, però s'ha modificat la cua de la locomotora. D'aquesta manera es pot veure si hi ha millores al minimitzar l'espai entre la locomotora i el primer vagó i l'adequació i continuïtat del flux al passar de la locomotora al primer vagó.

La distància entre el primer i el segon vagó no s'ha modificat, ja que sinó es complicaria el disseny de tot el tren. La idea principal és modificar únicament la locomotora, i així s'ha fet.

En les figures es pot veure que hi ha millora tant a les simulacions amb la locomotora com en les que hi ha diferents vagons.

Aquesta modificació de la part posterior només s'ha dissenyat per aquest model. Això és així perquè només es volia comprovar si hi havia millora al realitzar aquest canvi. Més tard es raonarà sobre si és una modificació significativa.

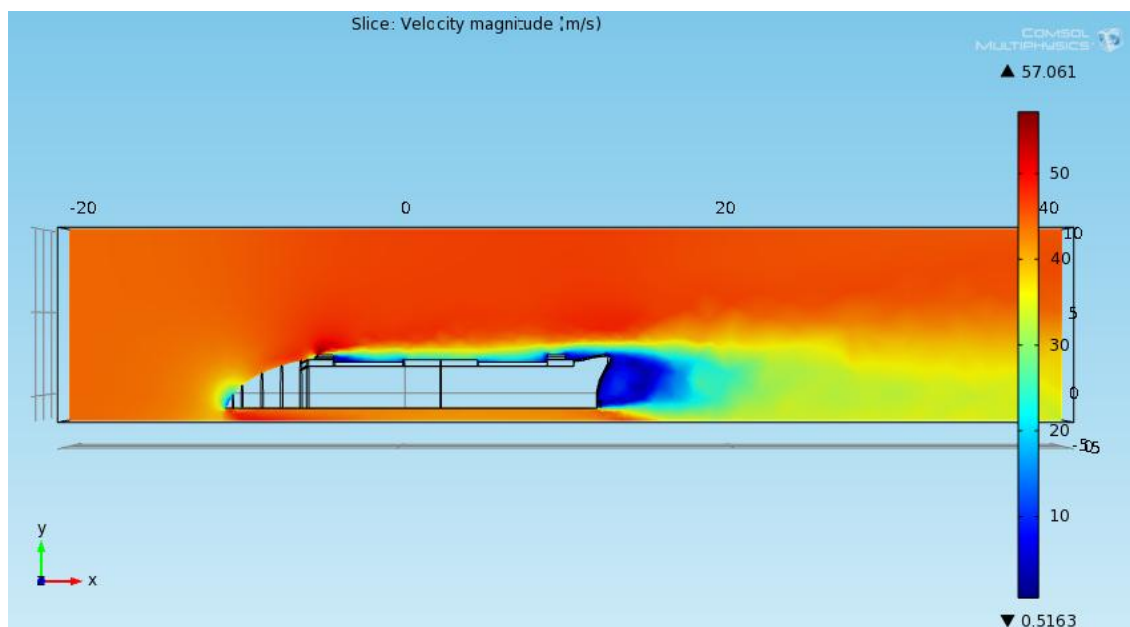


Fig. 6.42. Velocitats del Shinkansen A-300 amb cua. Font: COMSOL Multiphysics.



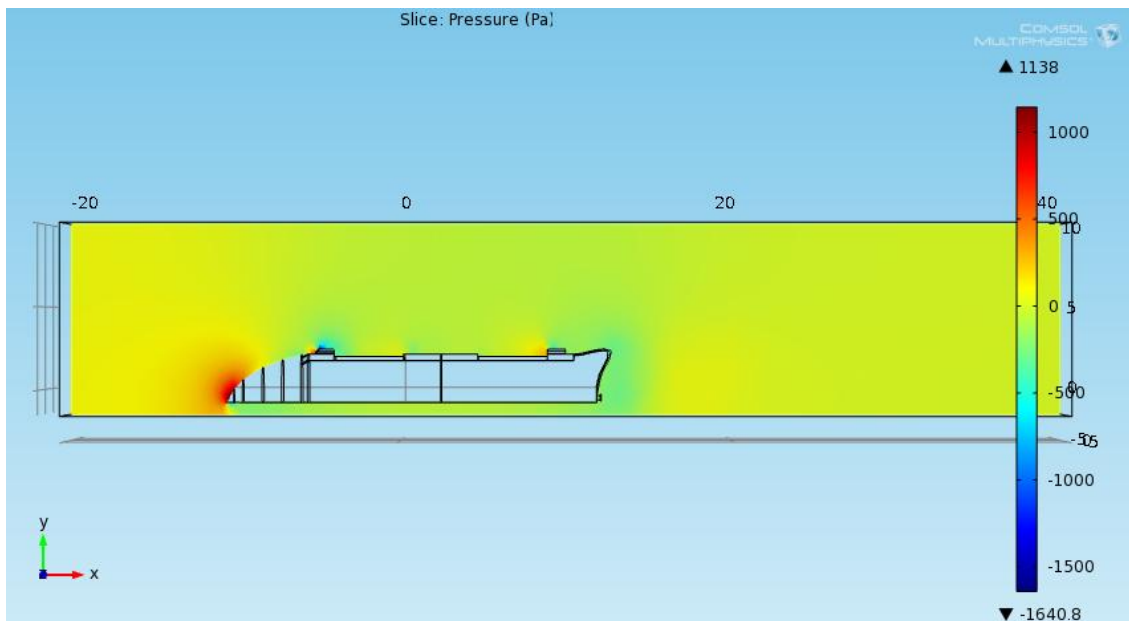


Fig. 6.43. Pressions del Shinkansen A-300 amb cua. Font: COMSOL Multiphysics.

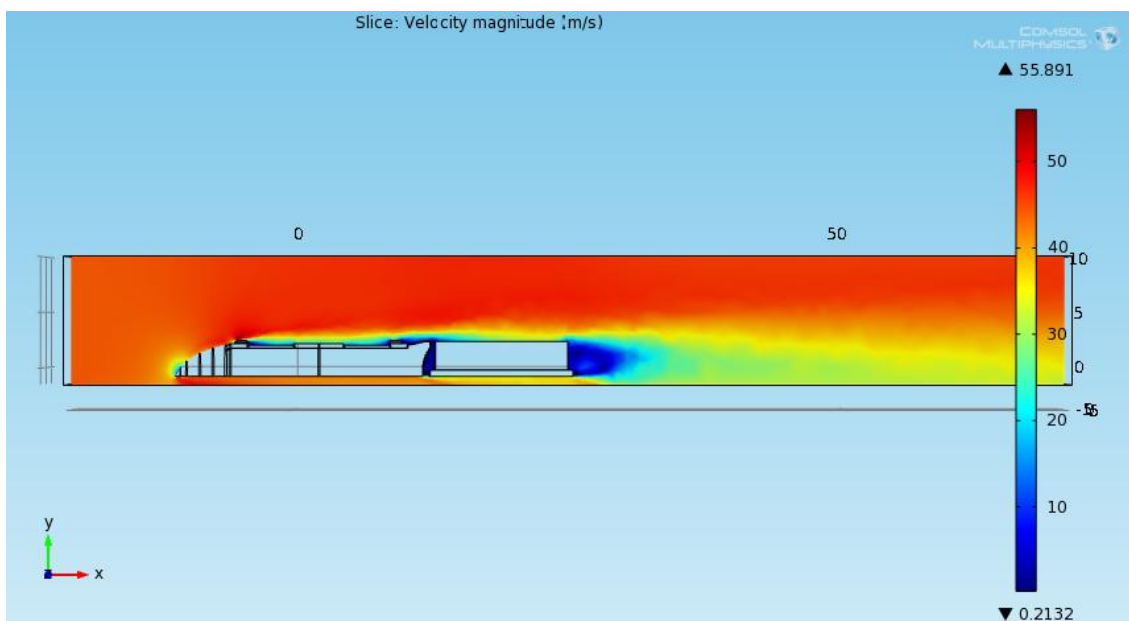


Fig. 6.44. Velocitats del Shinkansen A-300 amb cua i un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

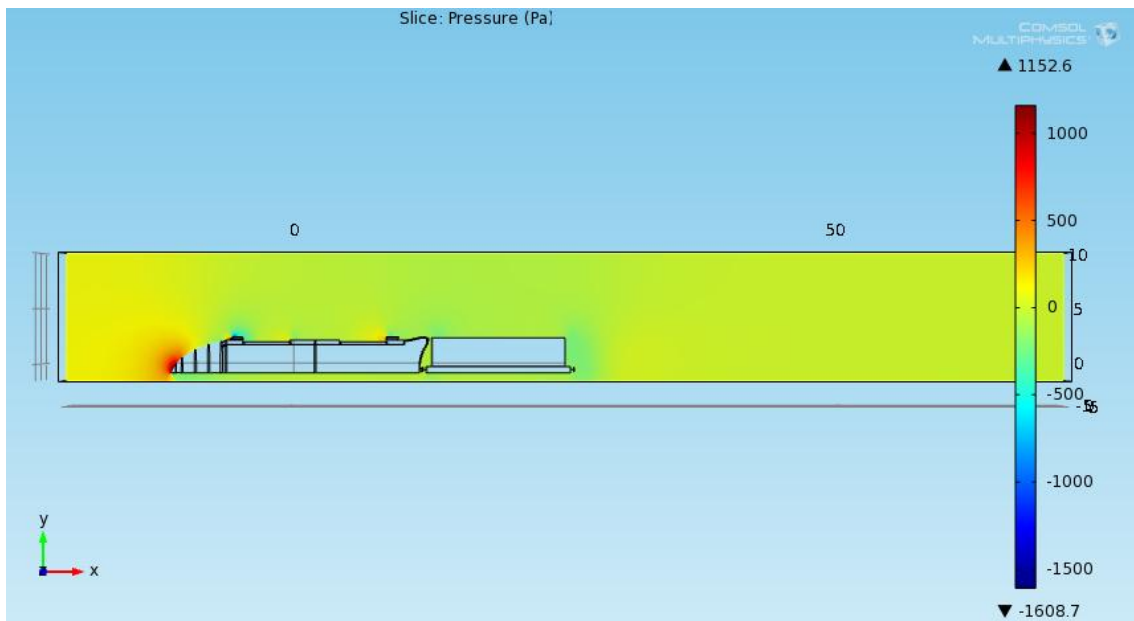


Fig. 6.45. Pressions del Shinkansen A-300 amb cua i un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

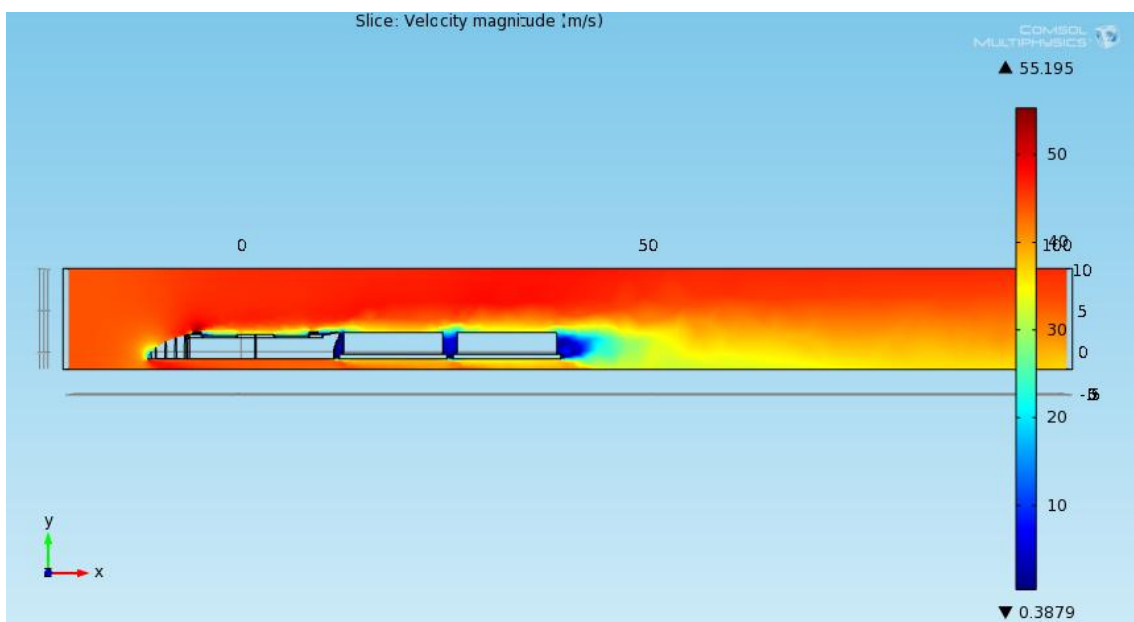


Fig. 6.46. Velocitats del Shinkansen A-300 amb cua i dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.



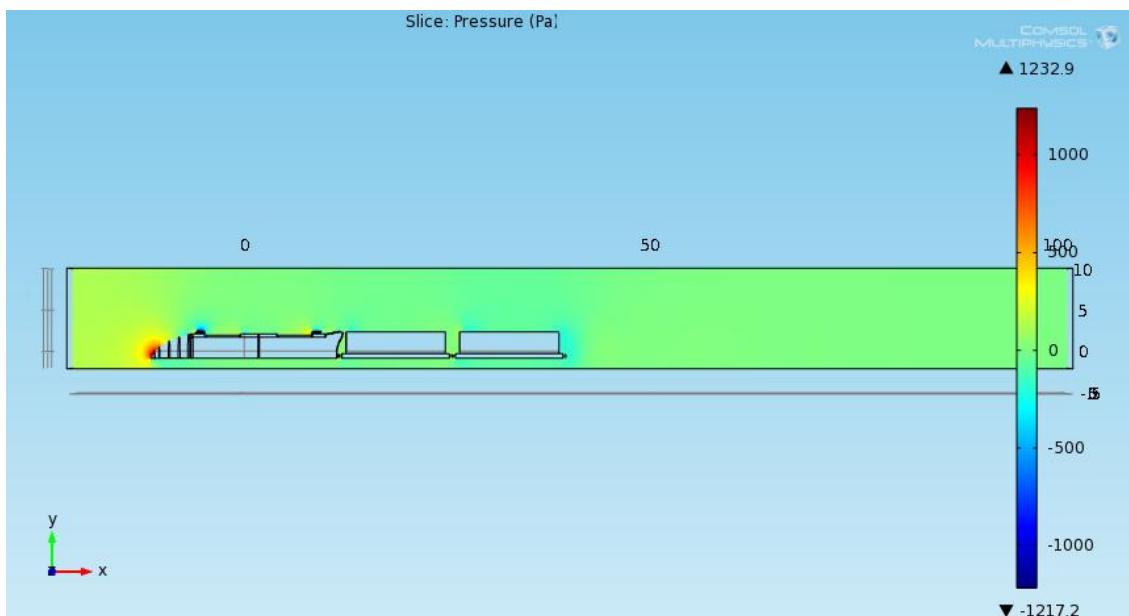


Fig. 6.47. Pressions del Shinkansen A-300 amb cua i dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
F_{resistència}	3616,81 N	4256,65 N	4726,42 N

Taula 6.7. Forces de resistència del Shinkansen A-300 amb cua. Font: Pròpia.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
P_{necessària}	159,139 kW	187,293 kW	207,962 kW

Taula 6.8. Potències aerodinàmiques del Shinkansen A-300 amb cua. Font: Pròpia.

6.5.5. Model 5: Disseny propi

L'últim model no ha estat copiat de cap tren real. És una modificació senzilla del tren original. D'aquí es podran extreure conclusions sobre si els dissenys escollits són de qualitat aerodinàmica. Si els comparem amb un realitzat a l'atzar, hauran de ser molt millors que aquest.

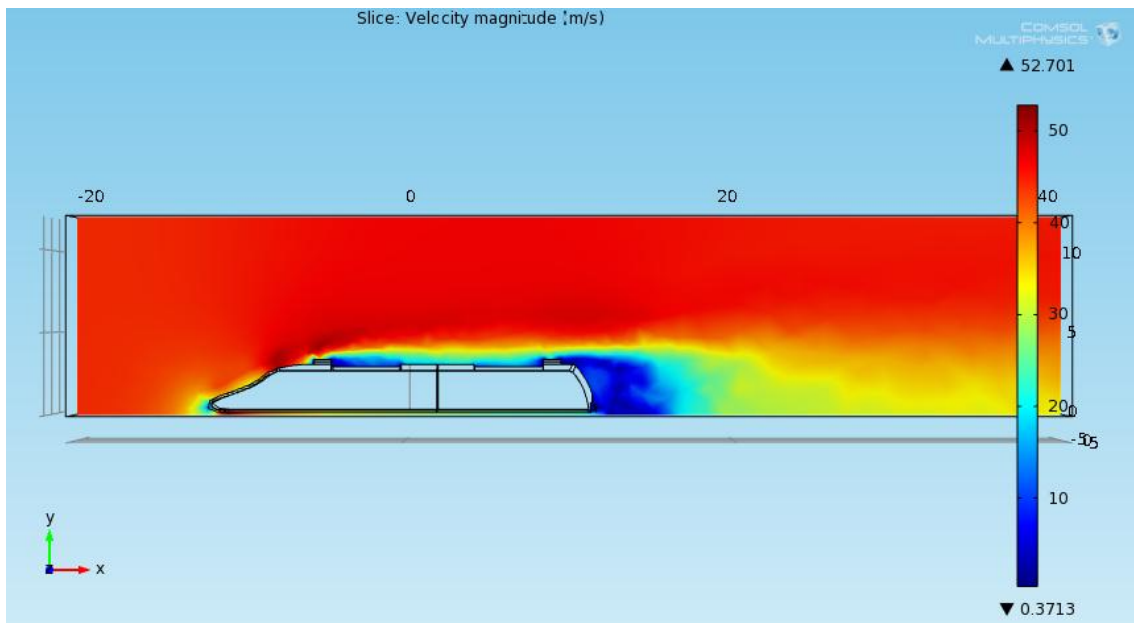


Fig. 6.48. Velocitats del disseny propi. Font: COMSOL Multiphysics.

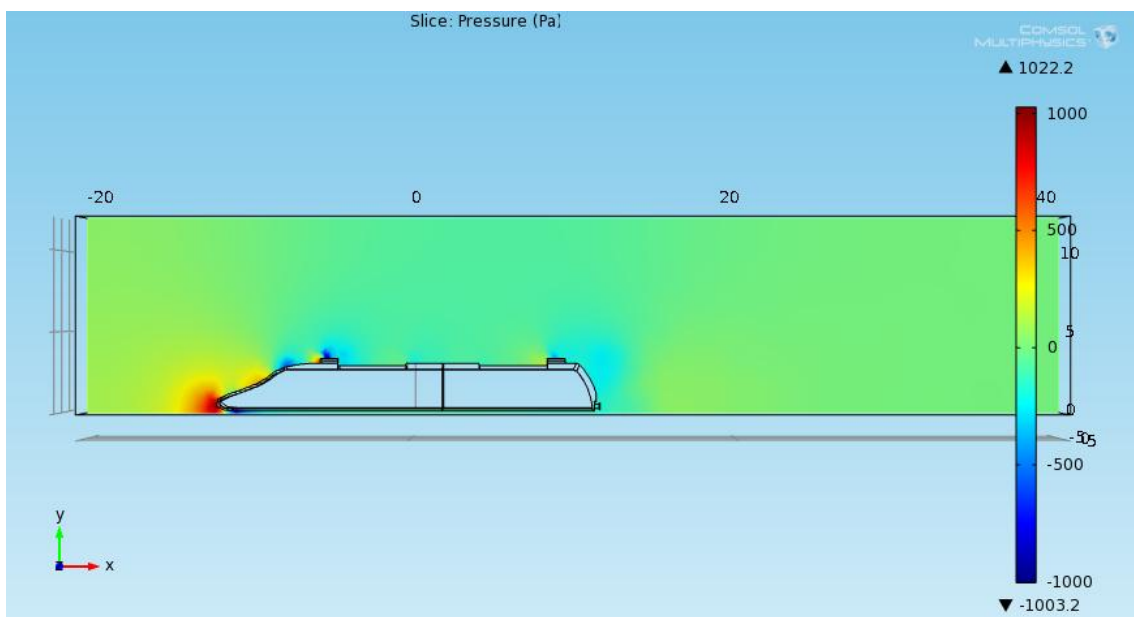


Fig. 6.49. Pressions del disseny propi. Font: COMSOL Multiphysics



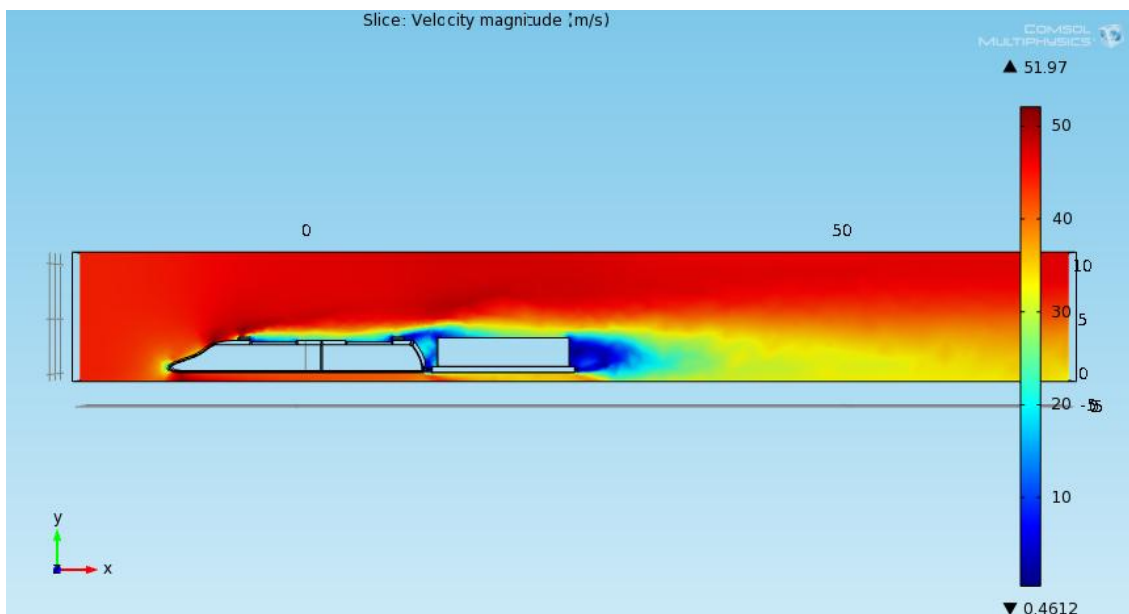


Fig. 6.50. Velocitats del disseny propi amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

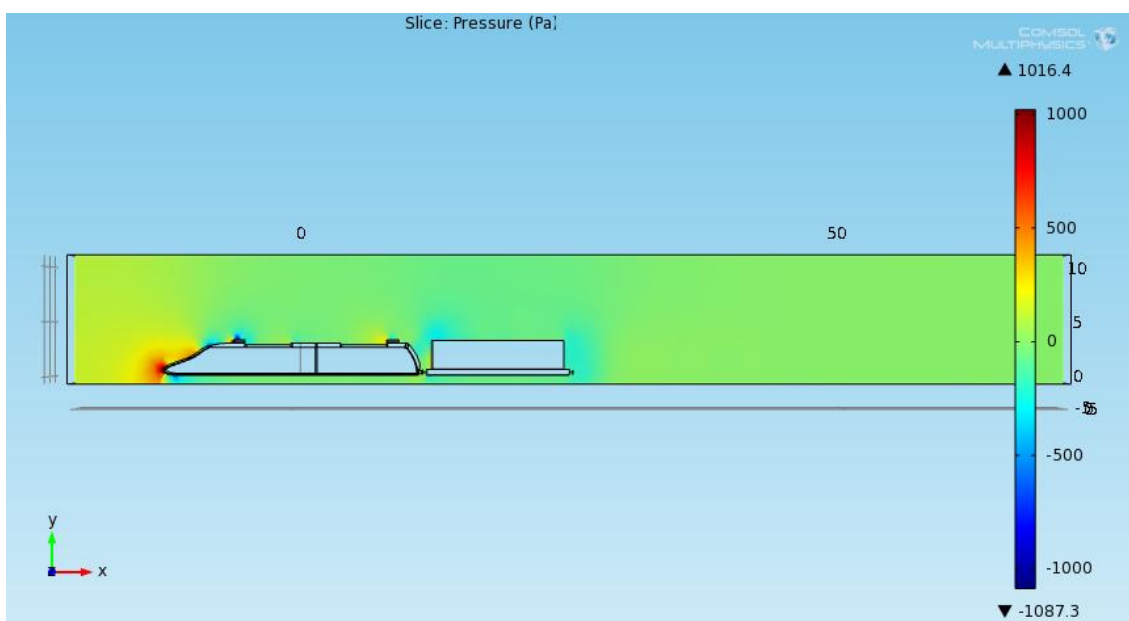


Fig. 6.51. Pressions del disseny propi amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

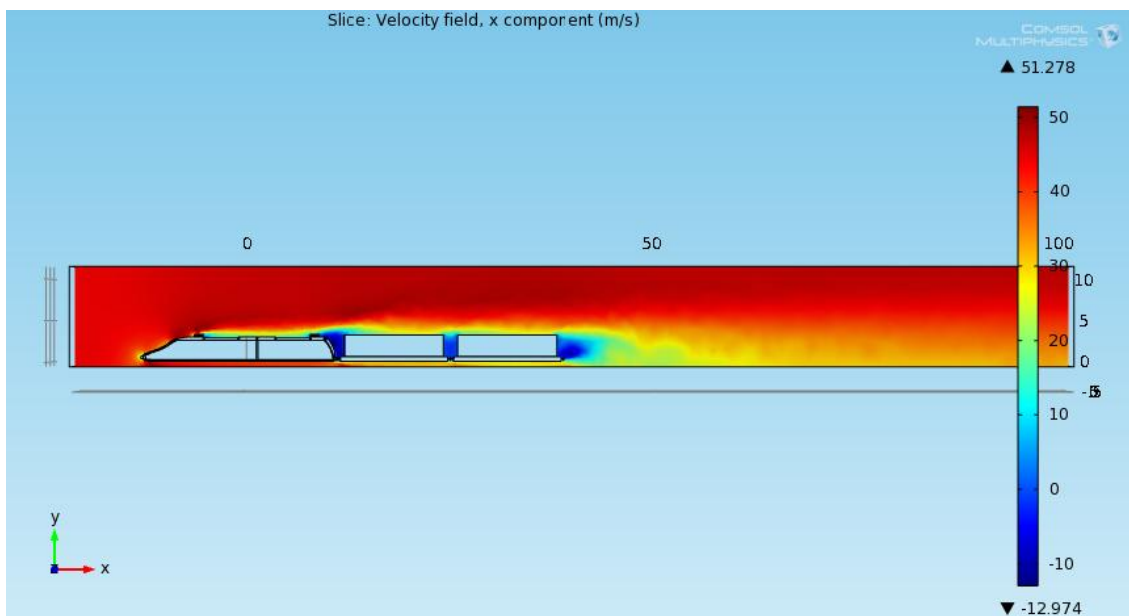


Fig. 6.52. Velocitats del disseny propi amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

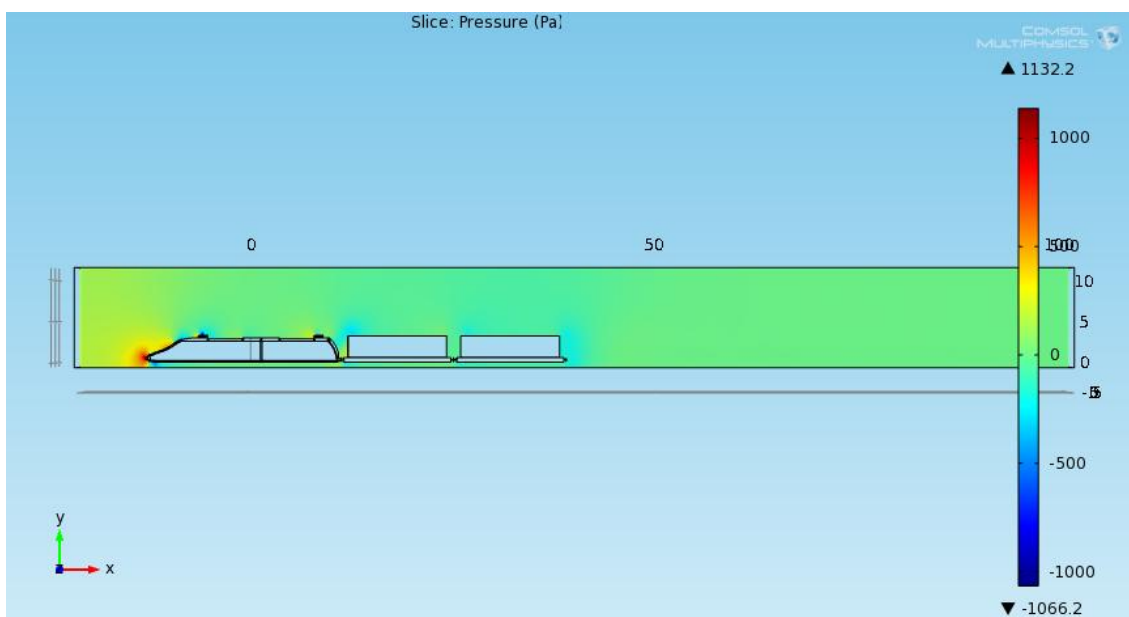


Fig. 6.53. Pressions del disseny propi amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
F_{resistència}	4199,8 N	5460,89 N	5656,13 N

Taula 6.9. Forces de resistència del disseny propi. Font: Pròpia.



	Locomotora	Un vagó	Dos vagons
$P_{necessària}$	184,791 kW	240,279 kW	248,870 kW

Taula 6.10. Potències aerodinàmiques del disseny propi. Font: Pròpia.

6.5.6. Resum dels resultats

Un cop finalitzat l'estudi teòric, es recullen tots els resultats i càlculs per tal de comparar els diferents models i extreure'n conclusions.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	5653,14 N	6402,13 N	6893,17 N
AVE-112	3788,27 N	4696,70 N	4907,86 N
SHINKANSEN	3936,98 N	4698,21 N	5338,80 N
SHINKANSEN amb cua	3616,81 N	4256,65 N	4726,42 N
DISSENY PROPI	4199,80 N	5460,89 N	5656,13 N

Taula 6.11. Forces de resistència a 44 m/s. Font: Pròpia.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	248,740 kW	281,690 kW	303,300 kW
AVE-112	166,684 kW	206,655 kW	215,946 kW
SHINKANSEN	173,227 kW	206,721 kW	234,907 kW
SHINKANSEN amb cua	159,139 kW	187,293 kW	207,962 kW
DISSENY PROPI	184,791 kW	240,279 kW	248,870 kW

Taula 6.12. Potències aerodinàmiques a 44m/s. Font: Pròpia.

A les dues taules anteriors és pot veure una diferència significativa entre el tren original i els diferents models dissenyats. Tant la força com la potència del tren original és superior als altres models. Això significa que existeix una notable millora aerodinàmica en qualsevol dels dissenys proposats.

Comparant les diferents transformacions es poden veure valors pròxims entre l'AVE i el Shinkansen, el model propi en canvi és una mica pitjor.

La Taula.6.13 presenta la reducció de la força de resistència a l'avanç que presenta cadascun dels models dissenyats comparats amb la força de resistència del model original.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons	Mitjana
AVE-112	67,01 %	73,36 %	71,20 %	70,52 %
SHINKANSEN	69,64 %	73,39 %	77,45 %	73,49 %
SHINKANSEN amb cua	63,98 %	66,49 %	68,57 %	66,34 %
DISSENY PROPI	74,29 %	85,30 %	82,05 %	80,55 %

Taula 6.13. Percentatge de la força de resistència a l'avanç en relació al model original a 44 m/s. Font: Pròpia.

El millor model és el Shinkansen amb cua, això vol dir que la transformació de la cua és important. Es pot comprovar a la Taula 6.13 que la variació de la força de resistència a l'avanç en aquest model és de 66,34%. En cas del model Shinkansen sense modificació de cua, el seu percentatge de millora és de 73,49%. Es pot concloure que la dotació d'una cua que minimitzi l'entre-vagó i doni continuïtat a la locomotora i al primer vagó millora substancialment la aerodinàmica general del tren.

El model que menys redueix la força de resistència a l'avanç es el disseny propi (80,55%), tot i que és força notòria la millora, s'han dissenyat models que aconseguen millors prestacions aerodinàmiques que aquest darrer.

Per poder comparar els diferents models, s'ha decidit variar la velocitat del tren de 160km/h a 200km/h. Així hi haurà més resultats que interpretar amb aquest altre paràmetre.

La hipòtesi de les noves simulacions és que les forces variaran de forma quantitativa però la diferència entre models serà proporcional a les taules de velocitat inferior. De la mateixa manera la nova taula de potències serà proporcional a les forces degut a que totes venen d'un producte d'elles amb una constant.



Les gràfiques dels diferents models són a l'annex B. No s'han adjuntat a la memòria degut a que són molt semblants a les anteriors i el que interessa són els resultats següents.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	8828,61 N	10002,43 N	10780,1 N
AVE-112	6225,18 N	7356,57 N	8689,13 N
SHINKANSEN	6123,47 N	7345,74 N	8362,36 N
SHINKANSEN amb cua	5650,82 N	6432,74 N	7390,44 N
DISSENY PROPI	6563,37 N	8541, 47 N	8845,93 N

Taula 6.14. Forces de resistència a 55 m/s. Font: Pròpia.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	485,57 kW	550,13 kW	592,91 kW
AVE-112	342,38 kW	404,61 kW	477,90 kW
SHINKANSEN	336,79 kW	404,02 kW	459,93 kW
SHINKANSEN amb cua	310,80 kW	353,80 kW	406,47 kW
DISSENY PROPI	360,99 kW	469,78 kW	486,53 kW

Taula 6.15. Potències aerodinàmiques a 55m/s. Font: Pròpia.

De la mateixa manera que succeeix a les taules anteriors que resumeixen els resultats de les simulacions a 44m/s, els valors de força i de potència del model original són en tots els casos superiors a qualsevol altre disseny realitzat. És a dir, continua existint una millora aerodinàmica substancial pel que fa als altres models.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons	Mitjana
AVE-112	70,51 %	73,55 %	80,60 %	74,89 %
SHINKANSEN	69,36 %	73,44 %	77,57 %	73,46 %
SHINKANSEN amb cua	64,01 %	64,31 %	68,56 %	65,62 %
DISSENY PROPI	74,34 %	85,39 %	82,06 %	80,60 %

Taula 6.16. Percentatge de la força de resistència a l'avanç en relació al model original a 55 m/s. Font: Pròpia.

A la taula anterior es pot comprovar que la millora aerodinàmica en el model de l'AVE i Shinkansen són força similars (aproximadament un 74%). La millora resulta superior en el cas del Shinkansen amb cua, on el valor de la força al avanç respecte l'original és de 65,62%. El pitjor disseny continua sent el propi amb una relació de la força a l'avanç de 80,6%.

Una dada molt útil a ser calculada és el coeficient de resistència a l'avanç. Aquest coeficient depèn de la geometria del perfil que s'estudia. Així que és una dada molt útil per determinar la forma òptima de les millores aerodinàmiques. El coeficient més baix correspon al millor model, aerodinàmicament parlant. És fàcil de calcular amb les dades extretes del programa de càlcul numèric, ja que es calcula utilitzant la força de resistència aerodinàmica i altres dades.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

(Eq. 6.2)

On:

- D : Força de resistència en N. S'utilitza la "D" pel terme anglès *drag* (arrossegar).
- ρ : Densitat del fluid en kg/m^3 .
- V : Velocitat en m/s.
- S : Superfície frontal perpendicular al flux en m^2 .
- C_D : Coeficient aerodinàmic de resistència, és adimensional.



A les taules següents són calculats els coeficients segons els valors de força obtinguts en les diferents simulacions a 44 i 55 m/s. Els resultats haurien de ser idèntics, ja que el coeficient només depèn de la geometria, però a causa de l'aproximació de decimals els valors poden canviar lleugerament. Així doncs es procedeix a fer una mitja aritmètica per determinar els coeficients de resistència a l'avanç.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	0,387	0,438	0,472
AVE-112	0,259	0,321	0,336
SHINKANSEN	0,269	0,322	0,365
SHINKANSEN amb cua	0,248	0,291	0,323
DISSENY PROPI	0,287	0,373	0,387

Taula 6.17. Coeficients de resistència a l'avanç a 44m/s. Font: Pròpia.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	0,387	0,438	0,472
AVE-112	0,272	0,322	0,381
SHINKANSEN	0,268	0,322	0,366
SHINKANSEN amb cua	0,247	0,282	0,324
DISSENY PROPI	0,287	0,374	0,387

Taula 6.18. Coeficients de resistència a l'avanç a 55m/s. Font: Pròpia.

Models	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	0,387	0,438	0,472
AVE-112	0,266	0,322	0,358
SHINKANSEN	0,269	0,322	0,366
SHINKANSEN amb cua	0,247	0,287	0,324
DISSENY PROPI	0,287	0,374	0,387

Taula 6.19. Mitja del coeficients de resistència a l'avanç. Font: Pròpia.

Un cop determinats els coeficients de resistència a l'avanç ja es pot procedir a interpretar els resultats, ja que aquesta nova dada és ideal per a l'objectiu del projecte, ja que depèn únicament de la forma de cada tren. Així es pot saber quin model és aerodinàmicament millor i quin dista de ser òptim.

S'observa que entre els models AVE i Shinkansen no hi ha gaire diferència, tot i que en la versió amb la cua modificada del Shinkansen sí que hi ha millora notable. Aquesta deducció cal tindre-la en compte alhora de redactar les conclusions, és important tant la part d'avantguarda com la reraguarda del tren, sobretot en la locomotora.

En definitiva es pot dir que hi ha un gran estalvi d'energia degut a la variació de la forma geomètrica, això comporta una reducció dels costos de funcionament del tren. És una bona manera de fer més eficient la xarxa de transport ferroviari de mercaderies.

6.6. Recomanacions

Per complementar l'estudi és podrien fer alguns assaigs experimentals i teòrics per tal de fer-lo més interessant. Degut a limitacions de temps del projecte encara es podria ampliar en alguns aspectes:

- Es podria realitzar un estudi a escala en túnel de vent. Malauradament els recursos són limitats i no es disposa de les eines i instal·lacions per portar-lo a la pràctica. L'estudi constaria d'un tren de mercaderies i un tren més aerodinàmic, els quals se'ls hi sotmetria a un vent paral·lel a la cara frontal, per tal de determinar les forces en la direcció del moviment. I posteriorment calcular-ne el coeficient de resistència a l'avanç.
- També seria útil complementar l'estudi teòric amb diverses simulacions que continguessin trens de mercaderies amb més vagons. Així es podria veure l'efecte aerodinàmic que comporta fer circular trens de 750m de llargada. Aquest estudi no s'ha fet degut a les limitacions del programari emprat. El mallat i posterior càlcul d'un model així seria massa complicat.



- Un altre estudi interessant seria la simulació CFD d'un tren amb vent lateral. Així es podria veure els efectes que té i complementar-ho amb l'assaig inclòs al projecte. Aquest procés seria fàcil de realitzar amb el programa, però el projecte adquiriria un abast massa gran segons les especificacions de realització del projecte.



7. Pressupost

Per confeccionar el pressupost es considera solament el temps aplicat en l'estudi, la simulació computacional, l'anàlisi de resultats i la redacció del document. La finalitat del projecte no és construir un tren, sinó exposar els resultats de l'estudi efectuat per tal que tant els fabricants de ferrocarrils com els responsables de la infraestructura els tinguin en compte de cara a les futures inversions.

Tipus de treball	Professional	Temps emprat (h)	Cost unitari (€/h)	Cost total (€)
Documentació general	Enginyer Industrial Junior	30	40	1.200
Documentació experimental	Enginyer Industrial Junior	10	40	400
Documentació teòrica	Enginyer Industrial Junior	10	40	400
Creació dels models amb SolidWorks	Enginyer Industrial Junior	70	40	2.800
Importació i preparació per a les simulacions	Enginyer Industrial Junior	10	40	400
Càlcul en simulacions	Enginyer Industrial Junior	20	40	800
Anàlisi dels resultats	Enginyer Industrial Junior	25	40	1000
Redacció de l'estudi	Enginyer Industrial Junior	100	40	4.000
Maquetació del projecte	Enginyer Industrial Junior	50	40	2.000

Total honoraris		13.000
+ 21% IVA		2730
Material informàtic		2000
Impremta i còpies CD		120
TOTAL		17.850 €

Taula 7.1. Taula de pressupostos. Font: Pròpia.

Una bona manera de visualitzar el pes econòmic de les activitats del projecte, és mitjançant un gràfic de les anteriors en percentatges.

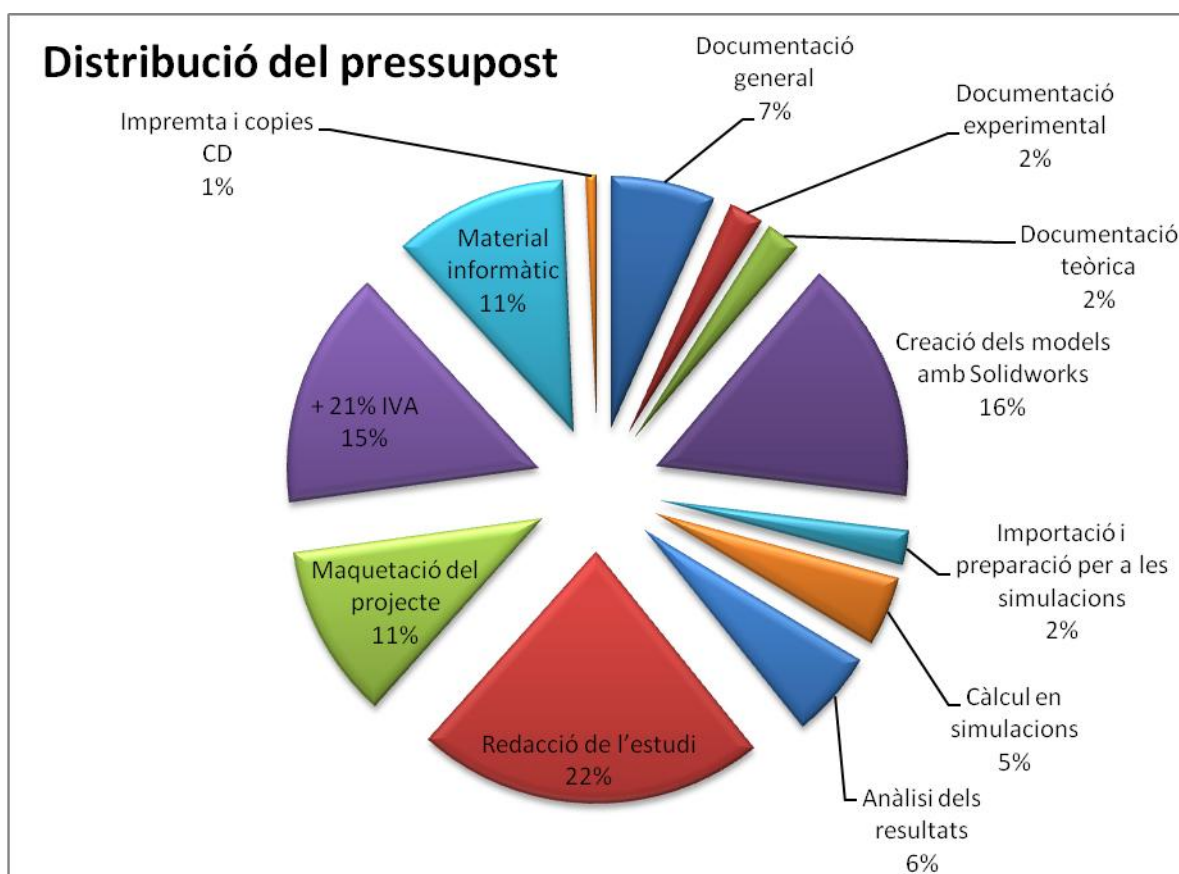


Fig. 7.1. Distribució del pressupost en percentatge. Font: Pròpia.



A la taula següent (Taula 7.2) es descriuen les diferents activitats que formen part del pressupost del projecte.

Tipus de treball	Descripció
Documentació general	Cerca sobre l'actualitat del transport ferroviari.
Documentació experimental	Cerca sobre estudis experimentals en túnel de vent.
Documentació teòrica	Cerca sobre informació teòrica d'aerodinàmica en trens.
Creació dels models amb SolidWorks	Disseny amb programari CAD dels diferents models usats en el projecte.
Importació i preparació per a les simulacions	Importació dels models dissenyats al programari de càlcul numèric i preparació de les característiques de simulació.
Càlcul en simulacions	Procés que realitza l'ordinador per a realitzar els càlculs de les equacions seleccionades en el programa CFD.
Anàlisi dels resultats	Interpretació i validesa dels resultats.
Redacció de l'estudi	Escrit dels diferents capítols del projecte.
Maquetació del projecte	Edició del projecte segons les normes de presentació imposades.
Material informàtic	Cost de dos ordinadors i del software de càlcul i disseny.
Impremta i còpies CD	Cost d'impressió del projecte i edició de les còpies digitals.

Taula 7.2. Taula de descripció de les activitats del pressupost. Font: Pròpia



8. Anàlisi mediambiental

En aquest apartat es fa referència a l'impacte mediambiental causat per l'aplicació de les solucions proposades en el projecte. L'anàlisi es basa en la comparació d'agents contaminants que resulta de realitzar el trasllat de certa quantitat de mercaderies des d'un punt de partida fins a una destinació. S'analitzarà la reducció de contaminants com ara les emissions de CO₂, hidrocarburs, diòxids de sofre, etc. La comparació es du a terme realitzant el transport en dos mitjans diferents: el tren de mercaderies i diversos camions.

Pel càlcul de les emissions de contaminants s'utilitza un software gratuït anomenat EcoTransit, finançat per diverses companyies ferroviàries europees.

8.1. Impacte mediambiental del transport de mercaderies

Es simula un trajecte que uneix el port de Barcelona i la ciutat de Berlín. S'utilitza el programa informàtic EcoTransit per a realitzar els càlculs referents a les emissions de contaminants segons el medi de transport escollit, i també pel càlcul del quilometratge realitzat entre els punts d'inici i final del trajecte.

EcoTransit identifica els impactes mediambientals del transport de mercaderies en termes de consum directe d'energia i les emissions que es produeixen durant el transport de les mercaderies. Els càlculs cobreixen també els consums indirectes i emissions provinents de la producció, el transport i la distribució energètica que es requereix per moure els vehicles.

EcoTransit compara el consum energètic i les emissions de les mercaderies transportades per tren, camió, vaixell i avió. També té en compte els serveis de transport intermodal i les diferents especificacions tècniques dels vehicles. En resposta a les necessitats de les empreses a nivell europeu, els criteris específics de cada país, com ara les combinacions energètiques o la topologia de cada nació, són inclosos en els càlculs.

8.1.1. Introducció de dades en el software

La introducció de les dades al software segueix el procés que s'indica a continuació.

Per començar, s'ha de seleccionar la forma d'introduir les dades pel càlcul. Hi ha dos tipus: l'estàndard i l'expert. La manera estàndard facilita un càlcul ràpid, mentre que el mode expert permet una especificació més precisa de la cadena de transport.

A continuació s'especifiquen les mercaderies a transportar en introduir el pes o nombre de contenidors i el tipus de mercaderia (granel, mercaderies de densitat de massa mitjana, mercaderies

lleugeres). En aquest cas que s'està estudiant s'opta per transportar 1.000 tones de mercaderies de tipus mitjà.

Es defineix l'origen introduint el nom corresponent, Port de Barcelona. Després es disposa de diferents modes de transport: camió, tren, avió, navegació marítima i navegació fluvial. Es trien les opcions camió i tren.

Finalment s'especifica el destí del transport. En aquesta cas la ciutat de Berlín. Després d'haver introduït tots els factors rellevants, es dona al botó "Calcular" per a començar el càlcul.

8.1.2. Resultats

El càlcul del itinerari per part del software indica un recorregut total per al ferrocarril de 1.940,79 km, mentre que el trajecte per carretera és d'un total de 1.800,92 km.

Cadena de transporte Road - 1.800,92 km	
Origen:	[Puerto] [es] Barcelona Road (24-40 t, EURO-V, Factor de carga:60.0%, FRV:20%, Ruta de ferry Normal)
Destino:	[Distrito urbano] [de] Berlin
Cadena de transporte Rail - 1.940,79 km	
Origen:	[Puerto] [es] Barcelona Rail (Eléctrico, Factor de carga:60.0%, FRV:50%, Ruta de ferry Normal)
Destino:	[Distrito urbano] [de] Berlin

Fig. 8.1. Especificacions dels trajectes. Font: EcoTransit.

El trajecte amb ferrocarril el realitza un únic tren d'uns 750m de longitud (uns 120 vagons de 20 peus), mentre que el trajecte per carretera s'ha de realitzar amb uns 40 camions de 40T de capacitat màxima.

A la figura anterior es mostra les dades per als dos tipus de transports. En el cas del camió el tipus de càrrega triada és la de 24-40 tones. El factor de càrrega es el rati entre la càrrega transportada i la càrrega màxima a transportar. El FRV és la distància extra en buit que recorre un vehicle en relació a la distància en càrrega atribuïda al transport. Aquestes dades són vinculades al càlcul per defecte. Si s'escull el tipus de càlcul expert poden ser modificades.

La primera dada mostrada en l'informe final ofert per EcoTransit és el total d'energia primària consumida, considerant l'energia primària com les formes d'energia disponibles a la natura abans de ser convertides o transformades.



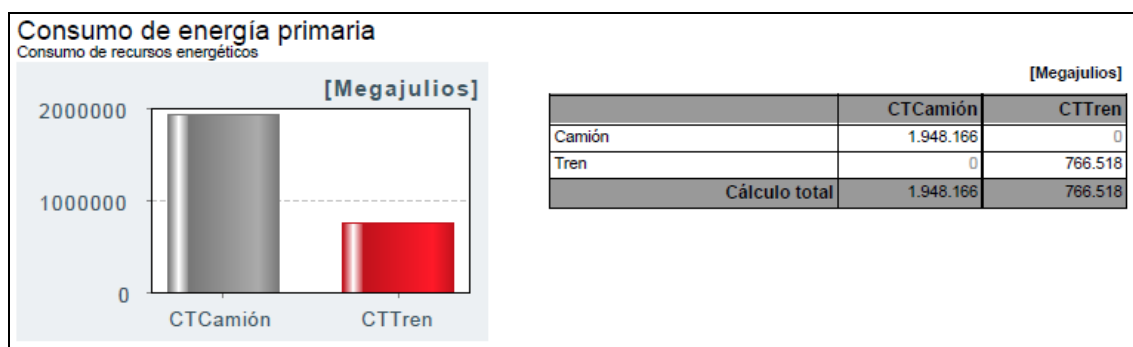


Fig. 8.2. Consum d'energia primària. Font: EcoTransit.

El consum d'energia primària en el cas del transport en camions és 2,54 vegades més que en el cas de realitzar el transport en un tren de mercaderies. És una dada força significativa a tenir en compte.

Aquesta energia primària es transformada, després, en energia consumida pels vehicles. Per a la transformació d'aquestes fonts d'energia primària i el consum de l'energia en els vehicles s'emeten gasos contaminants degut als diferents processos de combustió que es duen a terme. Les emissions de CO₂ degudes als trajectes es comparen en la següent imatge.

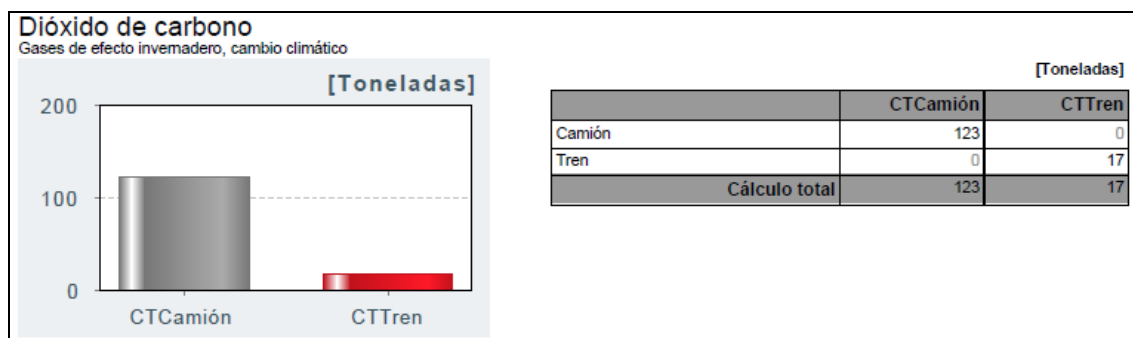


Fig. 8.3. Comparativa diòxid de carboni. Font: EcoTransit.

Les emissions produïdes pels camions són de 123 tones, unes 7,25 vegades més que les emissions generades pel tren (17 tones). És una diferència molt significativa pel que fa l'impacte mediambiental que tenen els dos mitjans proposats.

No només s'ha de tenir en compte l'emissió de CO₂ sinó també altres factors importants causants, entre altres, d'efectes com l'smog, l'acidificació de les pluges i altres efectes en la salut de les persones. Aquest factors són, entre d'altres, les emissions d'òxids de nitrogen, hidrocarburs no metàncics, diòxids de sofre i partícules referents a la combustió de combustibles fòssils.

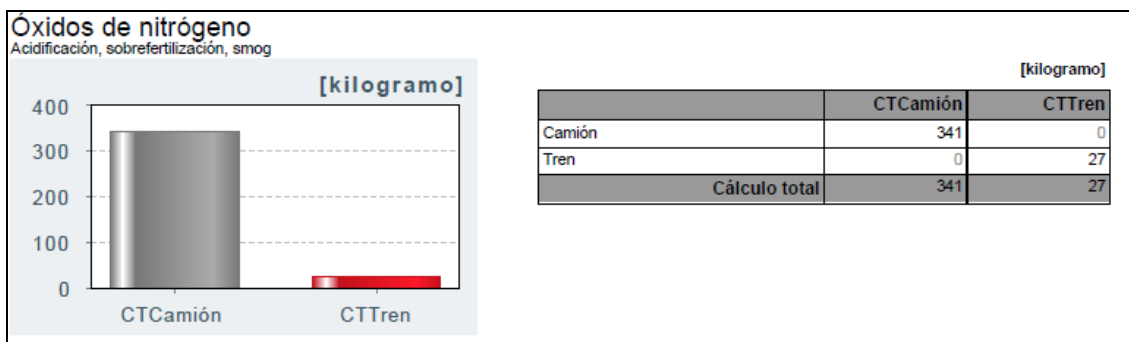


Fig. 8.4. Comparativa d'òxids de nitrogen. Font: EcoTransit.

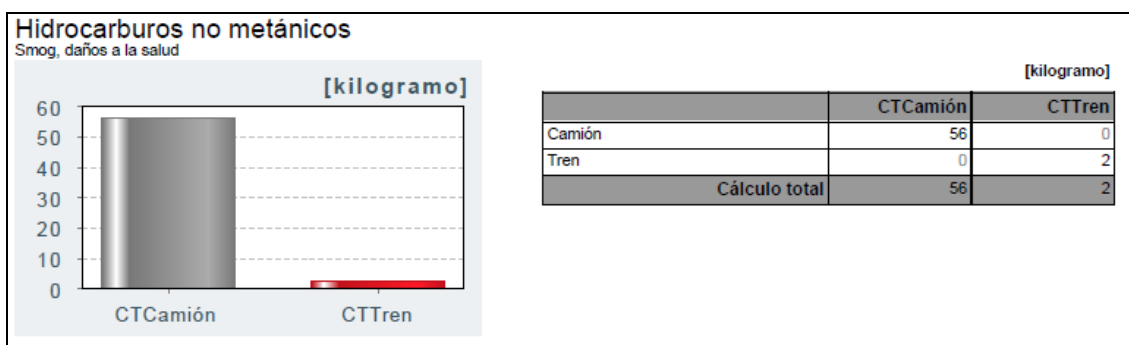


Fig. 8.5. Comparativa d'hidrurs no metàl·lics. Font: EcoTransit.

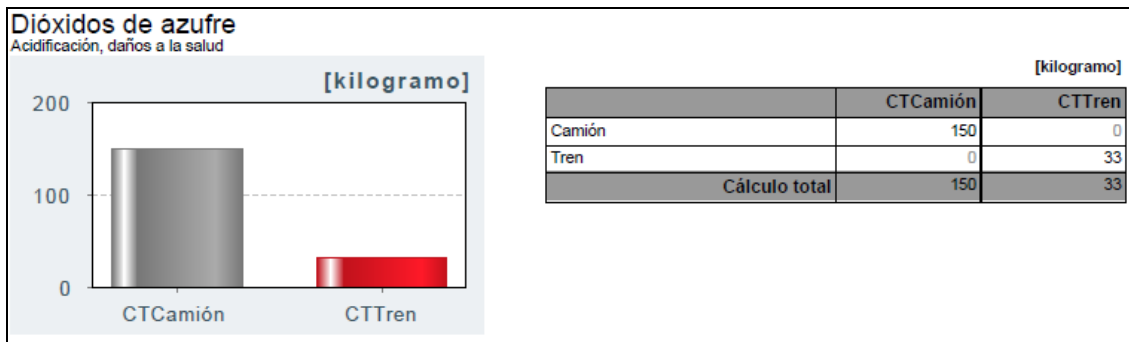


Fig. 8.6. Comparativa diòxid de sofre. Font: EcoTransit.



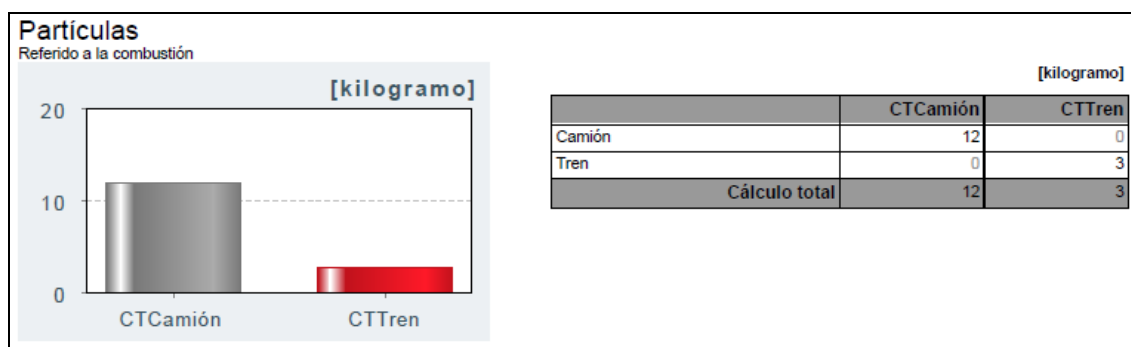


Fig. 8. 7. Comparativa de partícules. Font: EcoTransit.

En els quatre gràfics anteriors es pot veure les emissions de contaminants emeses pels camions és molt superior a les emeses pel transport amb ferrocarril. Es veu, llavors, que un dels punts més favorables del transport amb ferrocarril és el seu poc impacte en el medi ambient en comparació amb el transport per carretera.

A continuació es mostra una taula comparativa entre els dos medis de transport i les seves característiques esmentades anteriorment.

	Unitats	Tren	Camión	Camión/Tren
Núm. de vehicles	-	1	40	40
Consum d'energia primària	MJ	766.518	1.948.166	2,54
CO₂	T	17	123	7,24
Òxids de nitrogen	kg	27	341	12,63
Hidrocarburs no metànics	kg	2	56	28
Diòxids de sofre	kg	33	150	4,54
Partícules de la combustió	kg	12	3	4

Taula 8.1. Comparativa de residus. Font: Pròpia

Com es pot veure a la taula el número de camions necessaris per transportar les 1000 tones de càrrega, que pot transportar un únic tren, és de 40 unitats. El consum d'energia és més de dues vegades i mitja inferior si el transport es realitza en tren de mercaderies. Una dada molt important és la reducció

d'agents contaminants. Pel que fa a les emissions de CO₂ la reducció és superior a 7 cops l'emissió dels camions. La dada es dispara quan es comparen les emissions d'òxids de nitrogen i hidrocarburs no metànics, sent, respectivament, de 12,63 i 28 cops inferiors en el cas de transport ferroviari. De la mateixa forma, succeeix igual en la comparació de diòxids de sofre i de les partícules procedent de la combustió, on la reducció en aquest cas és, respectivament, de 4,54 i 4 vegades inferior.

Per tant, s'extreu d'aquesta taula que, no només es consumeix menys energia primària, transportant la mateixa càrrega, sinó que també es redueixen dràsticament les emissions de tots els agents contaminants.

8.2. Impacte ambiental degut al procés de fabricació

En aquest cas, es considera que totes les modificacions aerodinàmiques realitzades en tots els models dissenyats dels ferrocarrils i els seus components no comportarien una major contaminació en el seu procés de fabricació. Aquestes són, bàsicament, unes modificacions de forma, i no tant de materials o procés productiu.



Conclusions

Una vegada presentat el projecte, es pot deduir que, pel transport de mercaderies, l'adaptació de les típiques formes aerodinàmiques que caracteritzen als trens d'alta velocitat és beneficiosa. Amb aquest raonament és compleix l'objectiu principal del projecte.

Es pot extreure del projecte que, a altes velocitats, l'aerodinàmica de qualsevol vehicle juga un rol importantíssim en la dinàmica d'aquest. És a dir, que les forces de resistència degudes al xoc d'un vehicle amb l'aire, s'incrementen de forma quadràtica respecte de la velocitat. És un fet a tenir en compte al realitzar qualsevol disseny de qualsevol vehicle exposat a altes velocitats.

La potència que ha de vèncer un tren de mercaderies modificat aerodinàmicament, es reduïda considerablement respecte el tren original. La reducció obtinguda dels models està compresa entre un 20% i un 35%, fet que demostra que la eficiència energètica és millorada notablement.

La millor dada per comparar la bondat dels diferents dissenys aerodinàmics és el coeficient de resistència a l'avanç. És un paràmetre adimensional que només depèn de la morfologia de l'objecte. Al llarg del projecte s'ha observat una reducció d'aquest coeficient respecte el tren original.

Els trens de mercaderies modificats no assoleixen les velocitats dels trens de passatgers d'alta velocitat, així que no es pot garantir un ús òptim mixt de les vies. La diferència de velocitat pot formar cues, empitjorant el servei de la línia de passatgers. Una solució és el transport nocturn de mercaderies, quan no hi ha trens de passatgers, d'aquesta manera l'estat amortitza l'elevat cost de la infraestructura.

Les simulacions CFD són una eina molt més econòmica que els assaigs en túnel de vent. Proporcionen resultats propers a la realitat i no requereix cap tipus de muntatge. És cert que seria bo ampliar l'estudi amb una part experimental, però en aquest projecte no es disposava dels recursos necessaris.

L'estudi amb CFD s'amortitzaria ràpidament en el supòsit de que es duguessin a terme les transformacions aerodinàmiques. En un curt període de temps es produirien beneficis degut als avantatges econòmics que comporta la reducció de potència.

L'augment del transport modal del ferrocarril comporta la reducció del transport per carretera. Aquest fet és positiu degut a que no només es consumeix menys energia primària, a igualtat de càrrega transportada, sinó que també es redueixen les emissions d'agents contaminants.

Finalment, l'aplicació de l'estudi esdevé una gran millora econòmica, mediambiental i logística en el transport terrestre de l'estat Espanyol. S'ajuda a amortitzar el cost d'infraestructures, es redueix el consum d'energia, es redueixen les emissions contaminants i es milloren els costos en el transport a la taxa modal de tren.



Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] Ministerio de Fomento – ADIF. *Plan estratégico para el impulso del transporte ferroviario de mercancías en España*. Septiembre 2010
- www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/.../10091401PEITMF.pdf
- [2] Ministerio de Fomento – ADIF. *Estudio del Corredor Ferroviario Mediterráneo*. 2011.
- [3] GARCÍA, A. *Dinámica de los trenes en alta velocidad*. 6ª edició. 2010.
- http://www.ffe.es/dep/PDF/dinamica_trenes_AV.pdf, 12 d'abril de 2011
- [4] Dr. Alexander Orellano. *Aerodynamics of high speed trains*. Bombardier, Stockholm KTH May 2010.
- [5] CHELI, F., CORRADI, R., ROCCHI, D., TOMASINI, G., MAESTRINI, E. *Wind tunnel tests on train scale models to investigate the effect of infrastructure scenario*. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. Vol. 98, 2010, p. 353-362.

Bibliografia complementària

- Ministeri de Foment. Observatorio del transporte intermodal terrestre y marítimo. 2011.
- Ministeri de Foment. Observatorio del ferrocarril en España. 2009.
- WHITE, F. *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill, 2008.
- COMSOL AB. *Introduction to COMSOL Multiphysics*. 2010.



Annexos

Resum

Aquesta part consta de 3 annexos. El primer annex és l'amortització del projecte considerant dos tipus de trens de mercaderies: elèctric i dièsel.

El segon annex és la recopilació de totes les gràfiques de pressió i velocitat que es deriven de realitzar les simulacions de tots els models dissenyats a una velocitat de 55 m/s.

Finalment, a la darrera part dels annexos, són descrites les especificacions tècniques que requereixen les eines de programari utilitzades. És a dir, les condicions informàtiques per a l'òptim funcionament del COMSOL Multiphysics i del SolidWorks.



Sumari

RESUM	85
SUMARI	87
A. AMORTITZACIÓ	89
A.1. Tren elèctric	91
A.2. Tren dièsel	93
B. GRÀFIQUES	95
C. COMPATIBILITAT DEL SOFTWARE EMPRAT	111
C.1. SolidWorks.....	111
C.1.1. Requisits del sistema	111
C.1.2. Arxius externs compatibles	111
C.2. COMSOL Multiphysics.....	111
C.2.1. Requisits del sistema	111
C.2.2. Arxius externs compatibles	112
BIBLIOGRAFIA	113



A. Amortització

En aquest apartat es pretén fer un estudi econòmic de la rendibilitat del projecte, és a dir, calcular la repercussió econòmica, l'estalvi, que suposen l'aplicació de les modificacions aerodinàmiques al tren original.

A l'actualitat la majoria de trens de mercaderies funcionen gràcies a l'electricitat, però encara existeixen trens que funcionen cremant combustible, dièsel en el cas dels ferrocarrils. Per aquest motiu s'analitzen les dues possibilitats per separat.

Es parteix de la taula de potències calculades com a producte de la força de resistència a l'avanç i cadascuna de les dues velocitats de l'aire (44 m/s i 55 m/s).

POTÈNCIES [W] Models 44 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	248.738,16	281.693,72	303.299,5
AVE-112	166.683,88	206.654,8	215.945,8
SHINKANSEN	173.227,12	206.721,24	234.907,2
SHINKANSEN amb cua	159.139,64	187.292,6	207.962,5
DISSENY PROPI	184.791,2	240.279,16	248.869,7

Taula A.1. Potències a 44m/s. Font: Pròpia

POTÈNCIES [W] Models 55 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
TREN ORIGINAL	485.573,55	550.133,65	592.905,5
AVE-112	342.384,9	404.611,35	477.902,2
SHINKANSEN	336.790,85	404.015,7	459.929,8
SHINKANSEN amb cua	310.795,1	353.800,7	406.474,2
DISSENY PROPI	360.985,35	469.780,85	486.526,2

Taula A.2. Potències a 55m/s. Font: Pròpia.

A continuació es calcula la diferència de potència de cada model respecte del disseny del tren original. El càlcul es realitza per les dues velocitats d'estudi. Aquesta variació de potència s'interpreta com la millora aerodinàmica aconseguida amb els diferents dissenys realitzats.

ΔPOTENCIA [W] Models 44 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
AVE-112	82.054,28	75.038,92	87.353,64
SHINKANSEN	75.511,04	74.972,48	68.392,28
SHINKANSEN amb cua	89.598,52	94.401,12	95.337
DISSENY PROPI	63.946,96	41.414,56	54.429,76

Taula A.3. Variació de potència a 44m/s. Font: Pròpia.

ΔPOTENCIA [W] Models 55 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
AVE-112	143.188,65	145.522,3	115.003,4
SHINKANSEN	148.782,7	146.118	132.975,7
SHINKANSEN amb cua	174.778,45	196.333	186.431,3
DISSENY PROPI	124.588,2	80.352,8	106.379,4

Taula A.4. Variació de potència a 44m/s. Font: Pròpia.

La següent taula mostra la variació d'energia per kilòmetre (kWh/km). Es calcula a partir de la taula de variacions de potència dividida per 1000, per obtenir l'energia expressada en kW, i dividida, també, per la velocitat d'aire incident, expressada en km/h. Aquestes dues taules fan referència a l'estalvi d'energia per kilòmetre que pateix el tren original en ser transformat en els corresponents dissenys realitzats.



ΔENERGIA [kWh/km] Models 44 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
AVE-112	0,51801944	0,47373056	0,551475
SHINKANSEN	0,47671111	0,47331111	0,43176944
SHINKANSEN amb cua	0,56564722	0,59596667	0,601875
DISSENY PROPI	0,40370556	0,26145556	0,34362222

Taula A.5. Variació d'energia per km a 44m/s. Font: Pròpia.

ΔENERGIA [kWh/km] Models 55 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons
AVE-112	0,723175	0,73496111	0,580825
SHINKANSEN	0,75142778	0,73796944	0,67159444
SHINKANSEN amb cua	0,88271944	0,99158056	0,94157222
DISSENY PROPI	0,62923333	0,40582222	0,53726944

Taula A.6. Variació d'energia per km a 55m/s. Font: Pròpia.

A.1. Tren elèctric

Primerament es realitzarà l'estudi en el cas del ferrocarril elèctric. Considerant un preu d'energia de 0,1790376 €/kWh, es calcula l'estalvi per cada kilòmetre corresponent a cada disseny, multiplicant aquest factor per tota la taula anterior. El preu de la energia ha estat extret de la pagina oficial de Endesa, tot i que no és del tot rigorós, ja que a vegades és la companyia ferroviària la que genera la seva electricitat i no ha de ser comprada a les pròpies companyies elèctriques. La columna "MITJA" és la mitja de les tres columnes anteriors.

ESTALVI [€/km]	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons	MITJA [€/km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km/Tren]
AVE-112	0,09274496	0,08481558	0,09873476	0,09209843	193.814,372	9.690,71
SHINKANSEN	0,08534921	0,08474049	0,07730297	0,08246422	216.457,51	10.822,87
SHINKANSEN amb cua	0,10127212	0,10670044	0,10775826	0,10524361	169.606,503	8.480,32
DISSENY PROPI	0,07227847	0,04681038	0,0615213	0,06020338	296.494,969	14.824,74

Taula A.7. Estalvi i distàncies d'amortització a 44m/s. Font: Pròpia.

ESTALVI [€/km]	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons	MITJA [€/km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km/Tren]
AVE-112	0,12947552	0,13158567	0,10398951	0,12168357	146.691,951	7.334,59
SHINKANSEN	0,13453383	0,13212428	0,12024066	0,12896625	138.408,3	6.920,41
SHINKANSEN amb cua	0,15803997	0,1775302	0,16857683	0,168049	106.219,018	5.310,95
DISSENY PROPI	0,11265643	0,07265744	0,09619143	0,0938351	190.227,328	9.511,36

Taula A.8. Estalvi i distàncies d'amortització a 55m/s. Font: Pròpia.

Considerant que el cost d'aquest projecte és el que apareix al pressupost de 17.850 €, els kilòmetres necessaris per que sigui rentable, sense obtenir benefici, es calculen dividint el cost entre la mitja. Els kilòmetres resultants són els que apareixen a la taula anterior a la columna "DISTÀNCIA NECESSÀRIA". Considerant un número de trens de 20 unitats als que se'ls ha fet les modificacions pertinents, els quilòmetres que haurien de recórrer cada tren són els que apareixen a la darrera columna.



A.2. Tren dièsel

En segon lloc es realitza l'estudi de viabilitat econòmica suposant que el tren utilitza com a font d'energia el combustible dièsel. En aquest cas es partirà de la taula que mostra la variació d'energia per quilòmetre presentada anteriorment. S'ha procedit a realitzar la mitja, per cada disseny de tren, del model locomotora, amb un vagó i amb dos.

ΔENERGIA [kWh/km] Models 44 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons	MITJA
AVE-112	0,51801944	0,47373056	0,551475	0,51440833
SHINKANSEN	0,47671111	0,47331111	0,43176944	0,46059722
SHINKANSEN amb cua	0,56564722	0,59596667	0,601875	0,58782963
DISSENY PROPI	0,40370556	0,26145556	0,34362222	0,33626111

Taula A.9. Variació d'energia per km a 44m/s i mitja. Font: Pròpia.

ΔENERGIA [kWh/km] Models 55 m/s	Locomotora	Tren amb 1 vagó	Tren amb 2 vagons	MITJA
AVE-112	0,723175	0,73496111	0,580825	0,6796537
SHINKANSEN	0,75142778	0,73796944	0,67159444	0,72033056
SHINKANSEN amb cua	0,88271944	0,99158056	0,94157222	0,93862407
DISSENY PROPI	0,62923333	0,40582222	0,53726944	0,52410833

Taula A.10. Variació d'energia per km a 55m/s i mitja. Font: Pròpia.

Per calcular quin és l'estalvi (€/km) es parteix de l'última columna. S'han de conèixer certes dades a l'hora de determinar el càlcul. Pel que fa al combustible dièsel es coneixen les següents:

- Densitat 0,85 kg/l
- PCI 42.800 kJ/kg
- Preu 1,459 €/l

La fórmula que s'utilitza per calcular l'estalvi és la següent:

$$Estalvi \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] = \frac{\text{Preu} \left[\frac{\text{€}}{\text{l}} \right] \cdot \Delta \text{Energia} \left[\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{km}} \right] \cdot \left[\frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} \cdot \text{h}} \right]}{\text{Densitat} \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right] \cdot \text{PCI} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]} \cdot 0,45 \left[\frac{\text{kW}_{\text{mecànic}}}{\text{kW}_{\text{tèrmic}}} \right] \quad (\text{Eq.A.1})$$

A l'Eq. A.1 l'últim terme fa referència al rendiment del motor de combustió dièsel. S'ha considerat que per cada kW tèrmic que proporciona el dièsel, el motor genera 0,45 kW mecànic.

A partir de l'estalvi per cada model, procedint d'igual forma que en el cas del ferrocarril elèctric, es calcula la distància total necessària a recórrer per fer viable el projecte. Suposant, igualment, que les modificacions son incloses en 20 trens, els quilòmetres que ha de recórrer cadascun apareixen a l'última columna de la taula següent.

MODELS 44 m/s	ESTALVI [€/km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km/Tren]
AVE-112	0,03342071	534.100,043	26.705,01
SHINKANSEN	0,02992464	596.498,415	29.824,92
SHINKANSEN amb cua	0,03819083	467.389,698	23.369,48
DISSENY PROPI	0,02184662	817.060,029	40.853,01

Taula A.11. Estalvi i distàncies d'amortització motor dièsel a 44m/s. Font: Pròpia.

MODELS 55 m/s	ESTALVI [€/km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km]	DISTÀNCIA NECESSÀRIA [km/Tren]
AVE-112	0,04415657	404.243,384	20.212,17
SHINKANSEN	0,04679931	381.415,881	19.070,79
SHINKANSEN amb cua	0,06098167	292.710,917	14.635,55
DISSENY PROPI	0,03405091	524.215,121	26.210,76

Taula A.12. Estalvi i distàncies d'amortització motor dièsel a 44m/s. Font: Pròpia.



B. Gràfiques

En aquest apartat s'ha adjuntat totes les gràfiques relacionades amb les simulacions a 55 m/s. No apareix a la memòria degut a que són molt semblants a les ja incloses. Així que per finalitat de consulta s'ha esdevingut a incloure-les a l'annex.

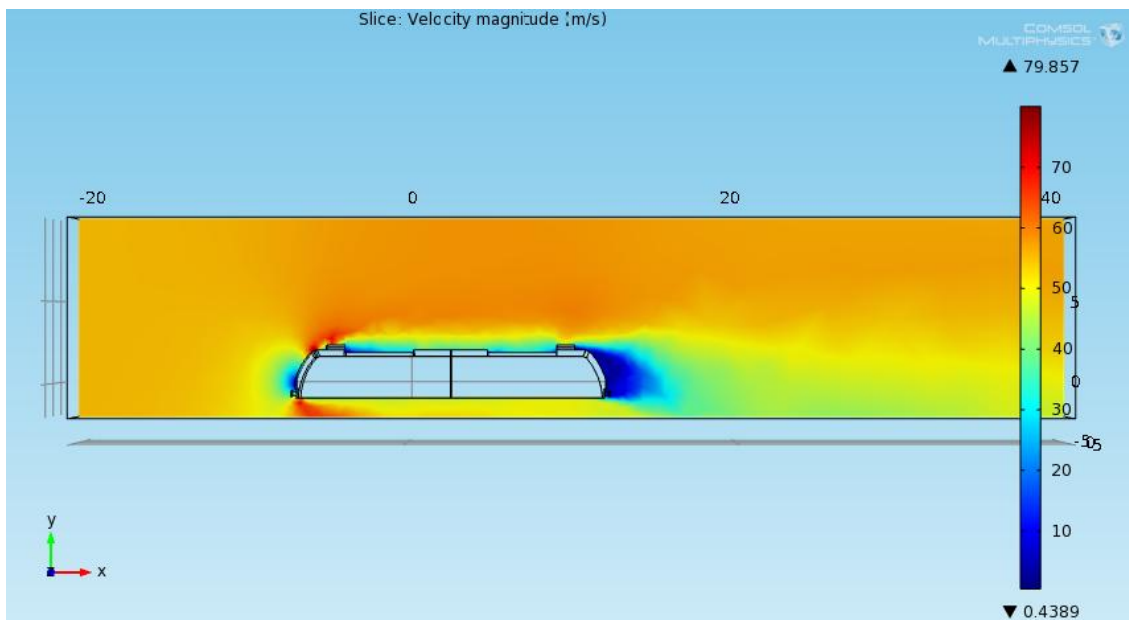


Fig. B.1. Velocitats del tren de mercaderies. Font: COMSOL Multiphysics.

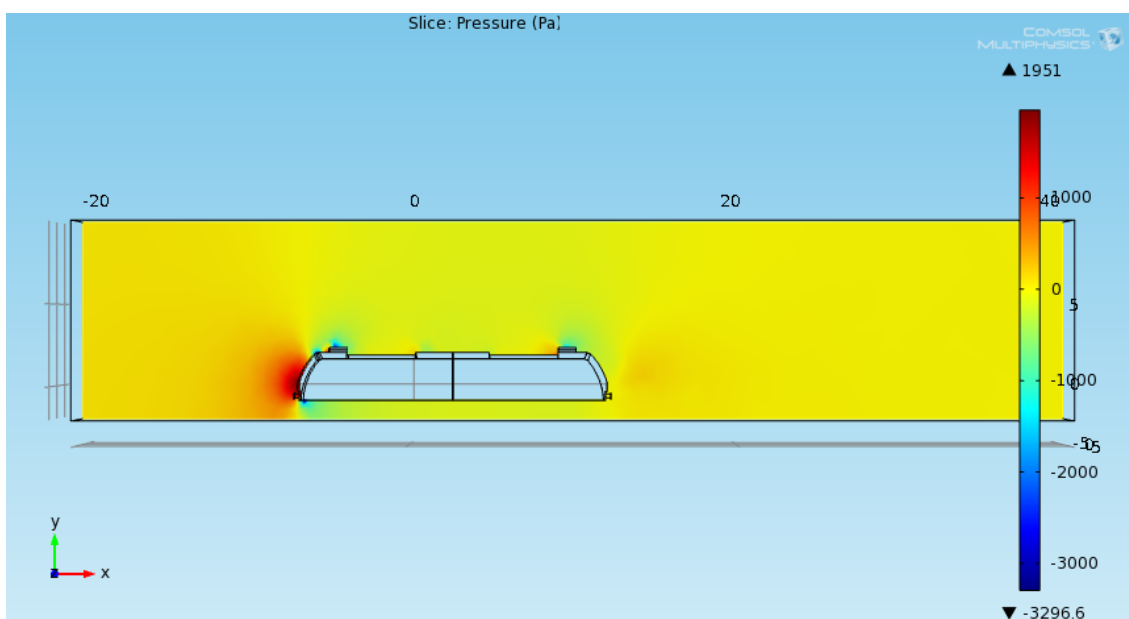


Fig. B.2. Pressions del tren de mercaderies. Font: COMSOL Multiphysics.

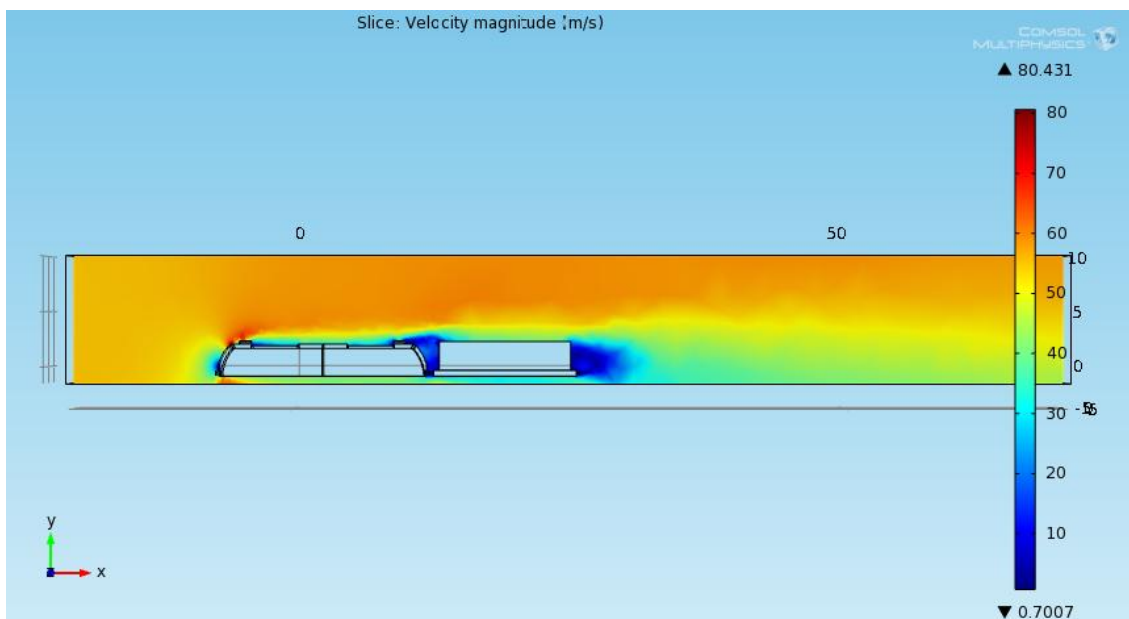


Fig. B.3. Velocitats del tren de mercaderies amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

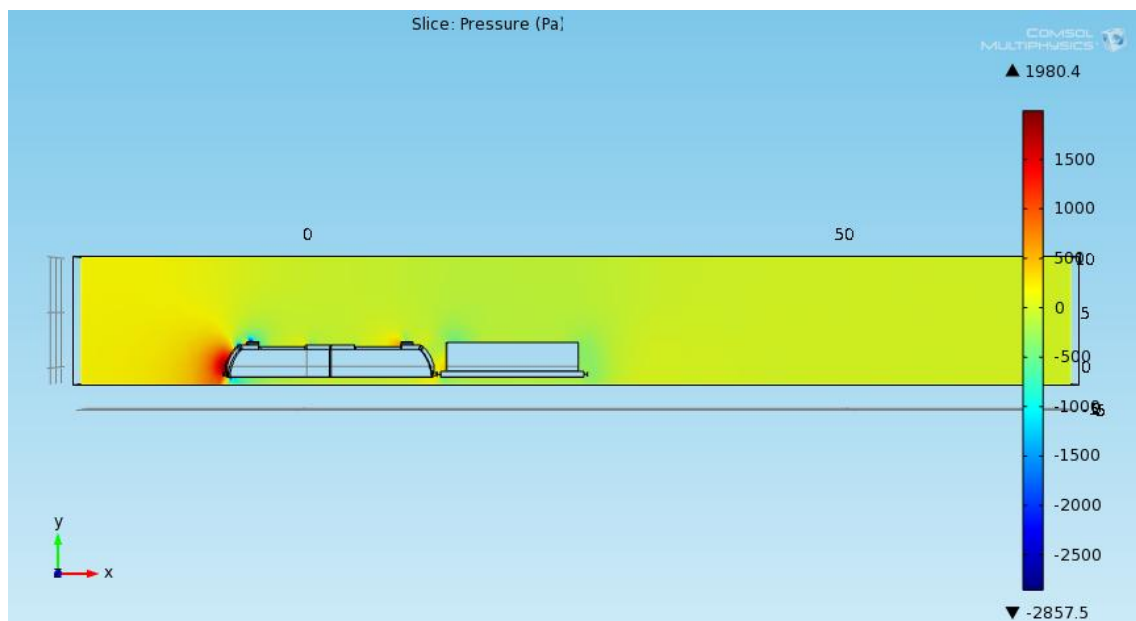


Fig. B.4. Pressions del tren de mercaderies amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.



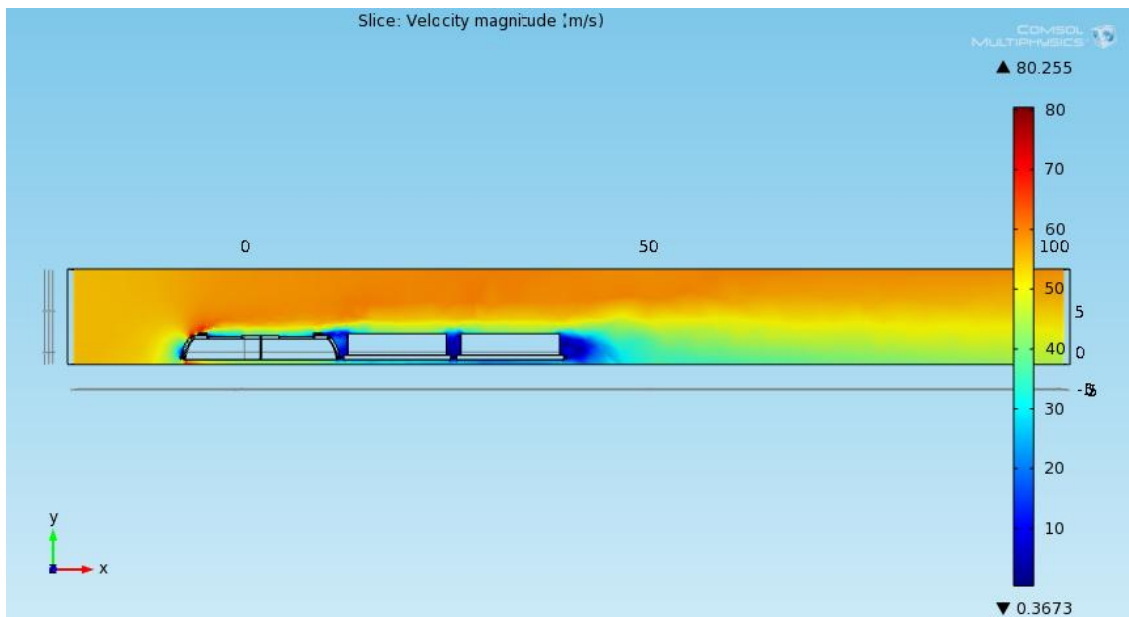


Fig. B.5. Velocitats del tren de mercaderies amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

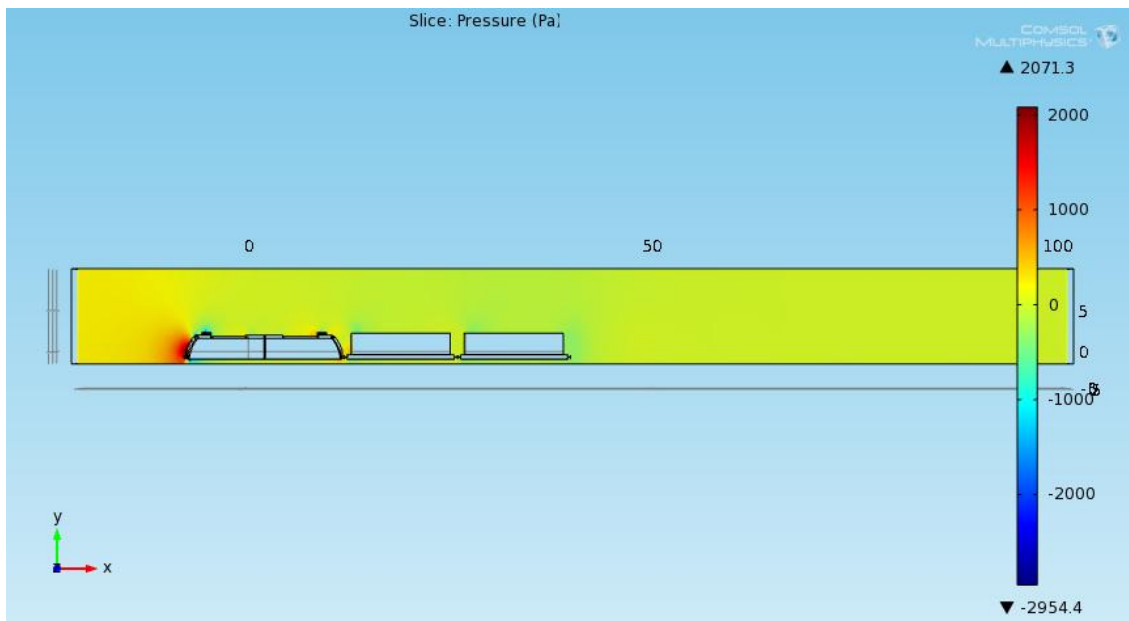


Fig. B.6. Pressions del tren de mercaderies amb dos vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

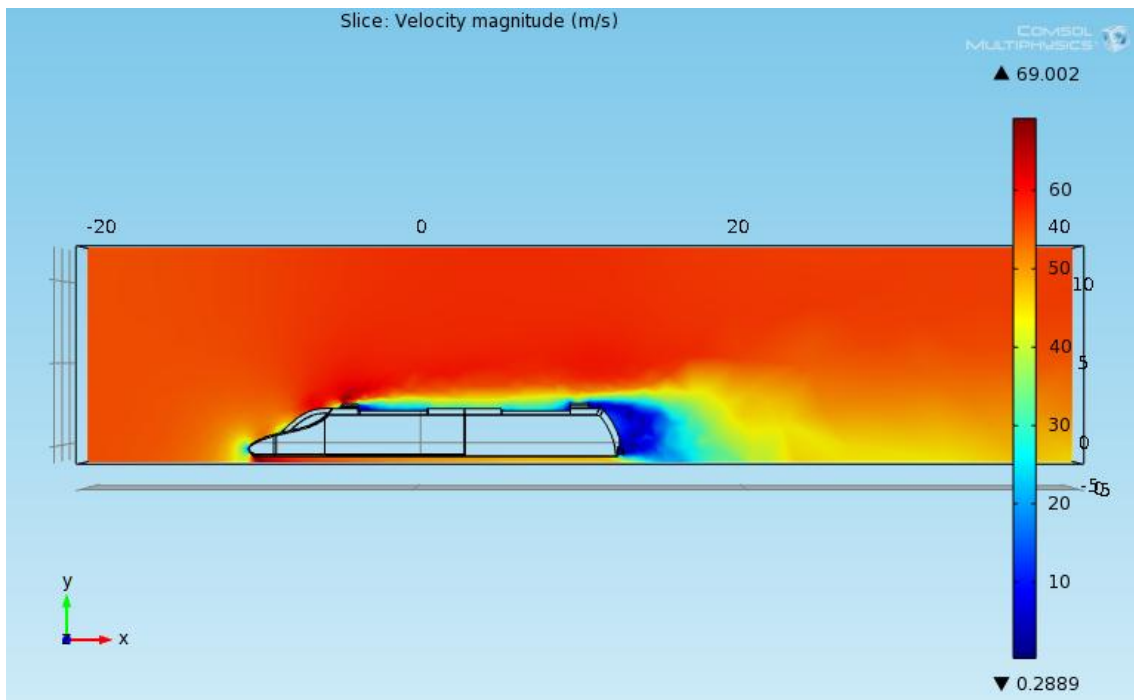


Fig. B.7. Velocitats de l'AVE 112. Font: COMSOL Multiphysics.

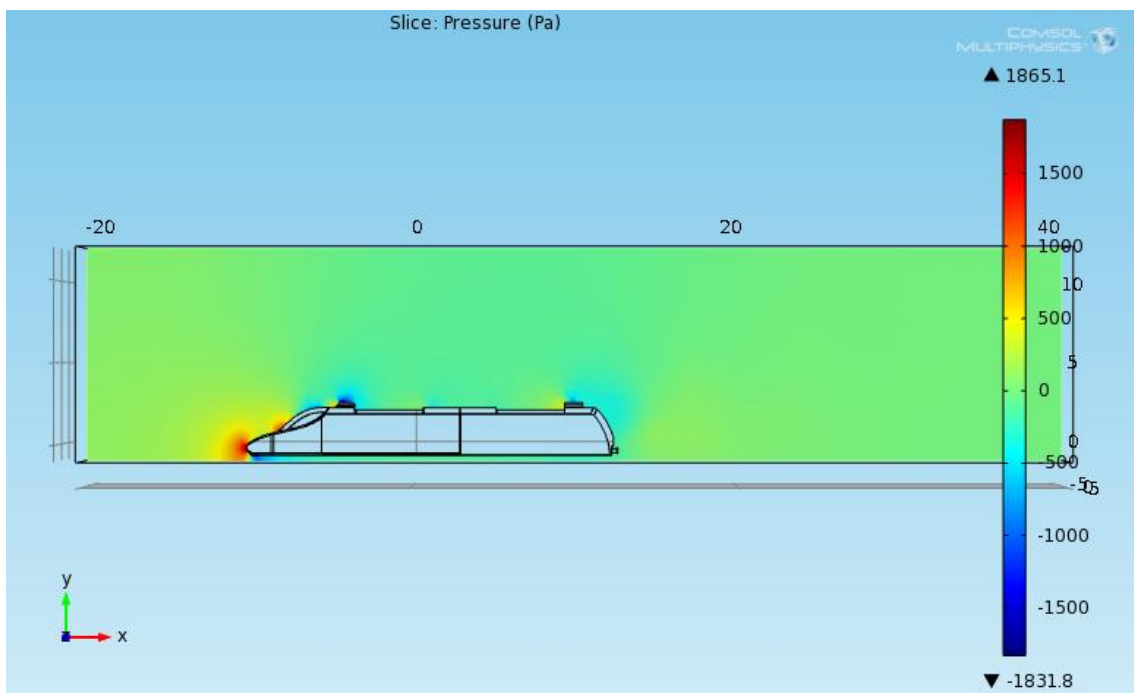


Fig. B.8. Pressions de l'AVE 112. Font: COMSOL Multiphysics.



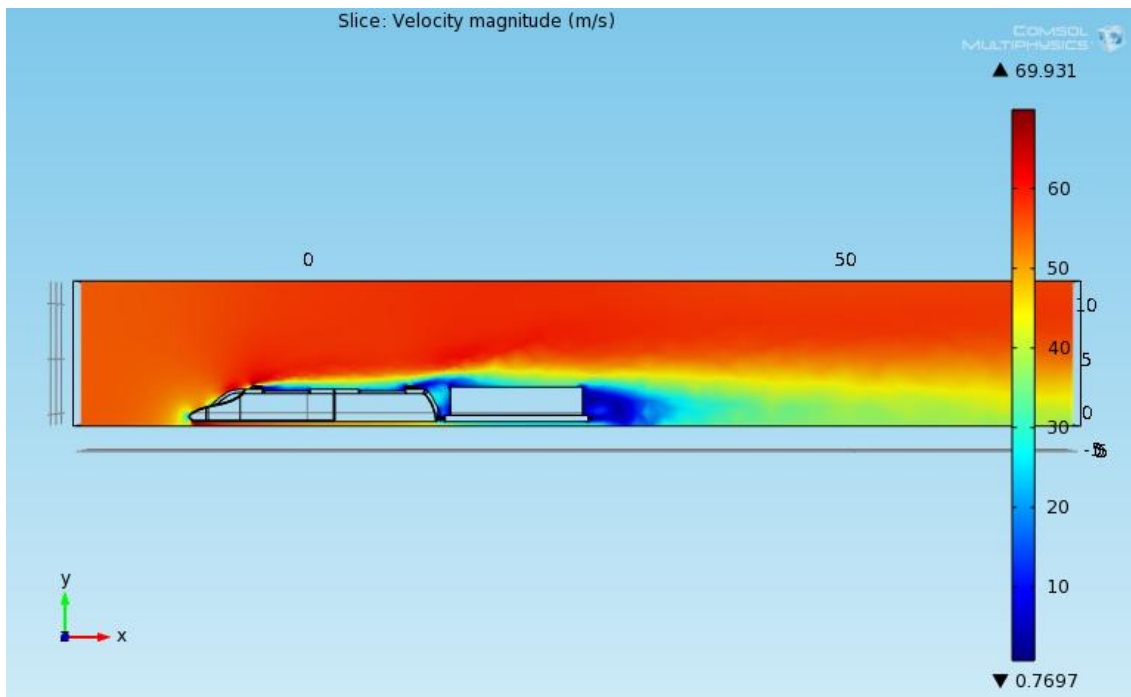


Fig. B.9. Velocitats de l'AVE 112 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

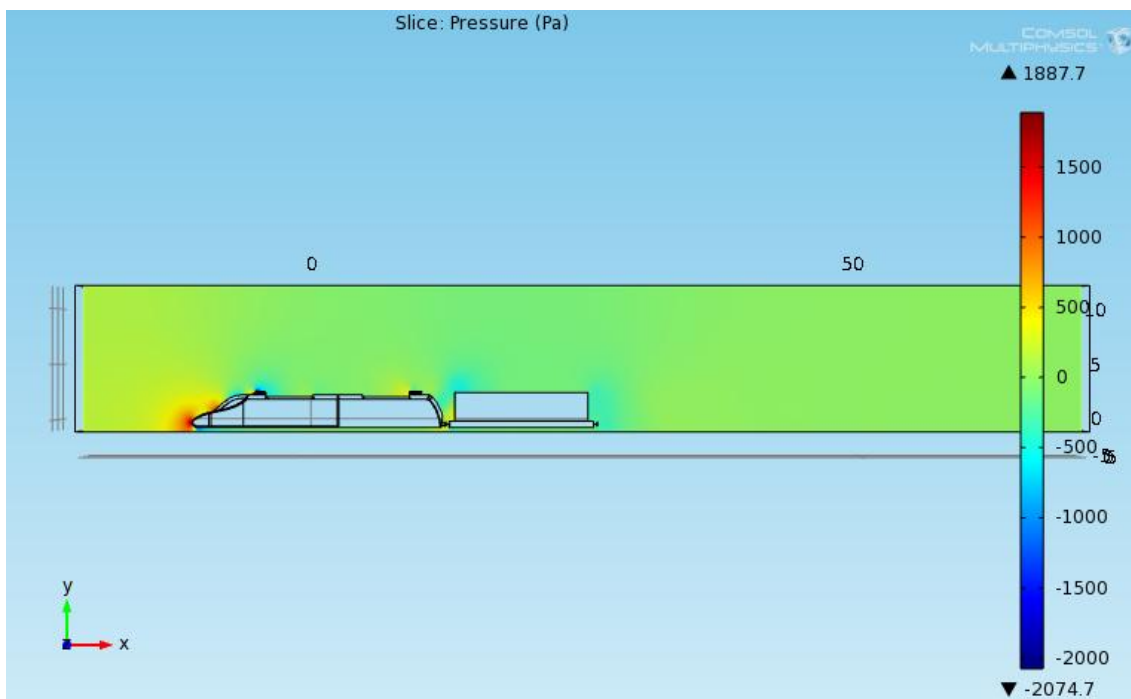


Fig. B.10. Pressions de l'AVE 112 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

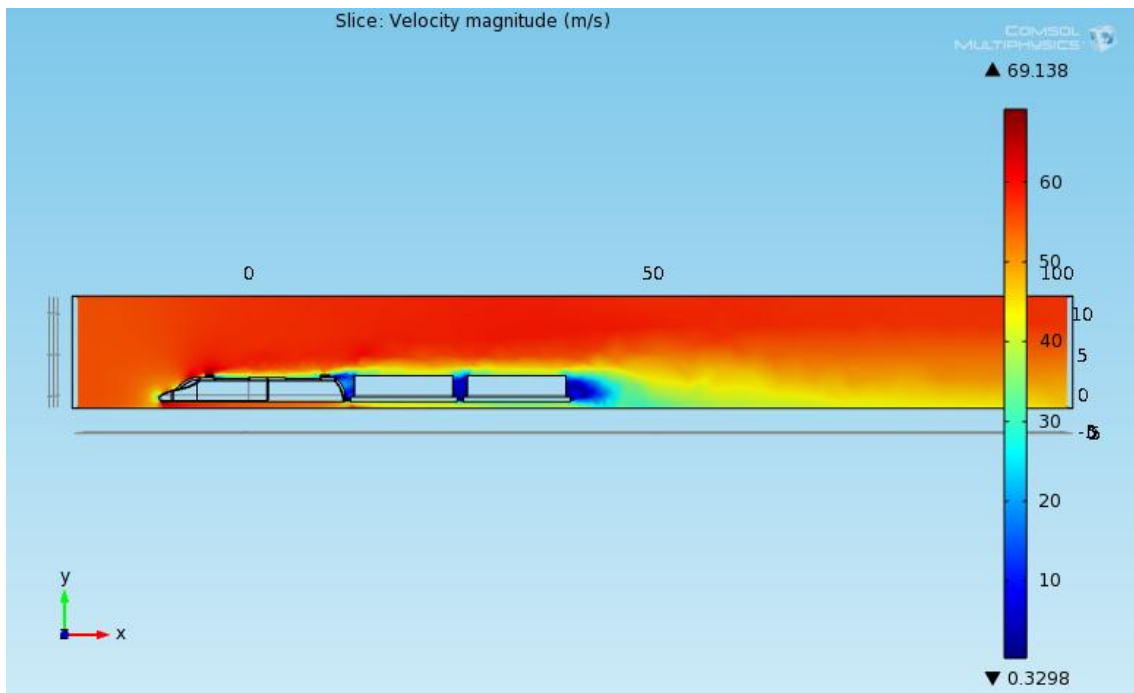


Fig. B.11. Velocitats de l'AVE 112 amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

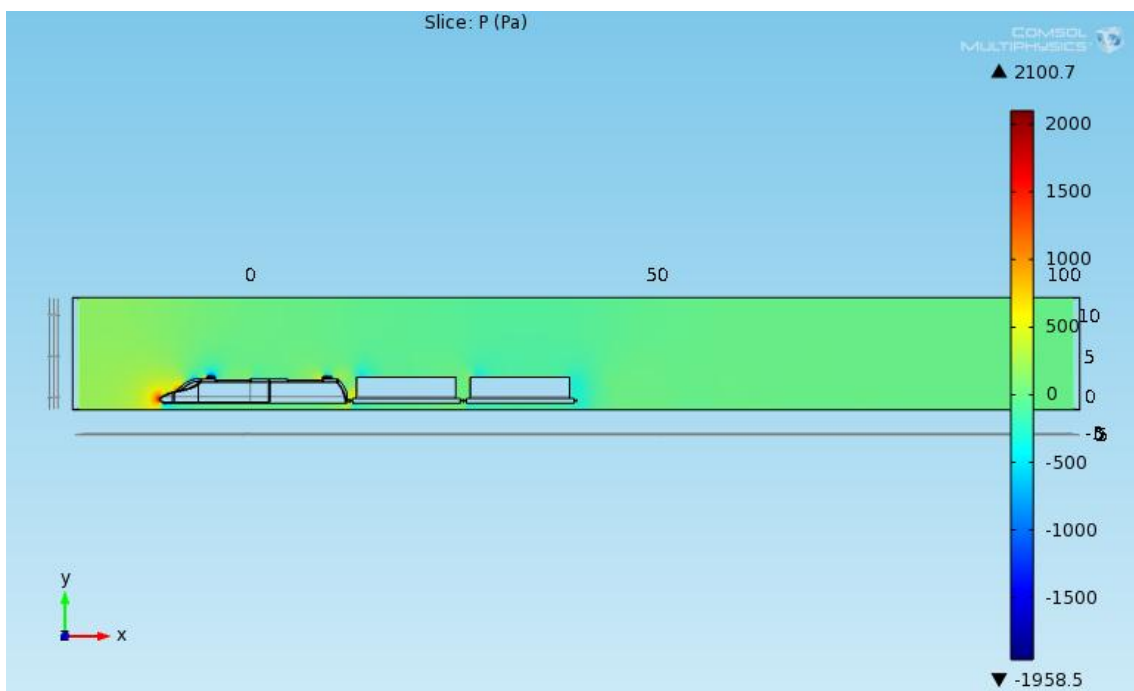


Fig. B.12. Pressions de l'AVE 112 amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.



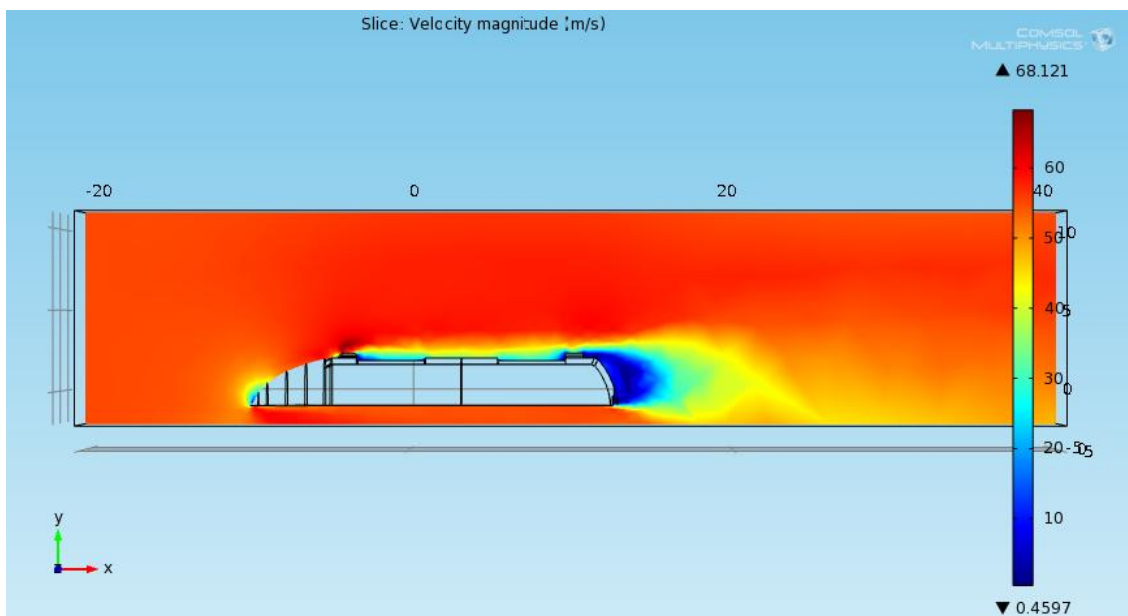


Fig. B.13. Velocitats del Shinkansen A-300. Font: COMSOL Multiphysics.

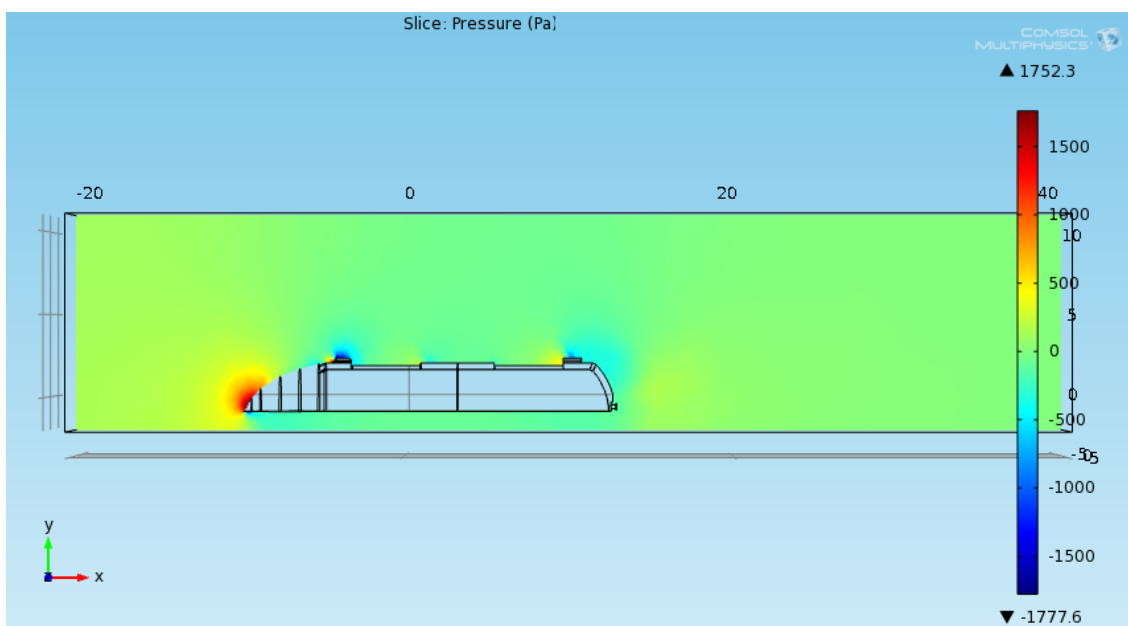


Fig. B.14. Pressions del Shinkansen A-300. Font: COMSOL Multiphysics.

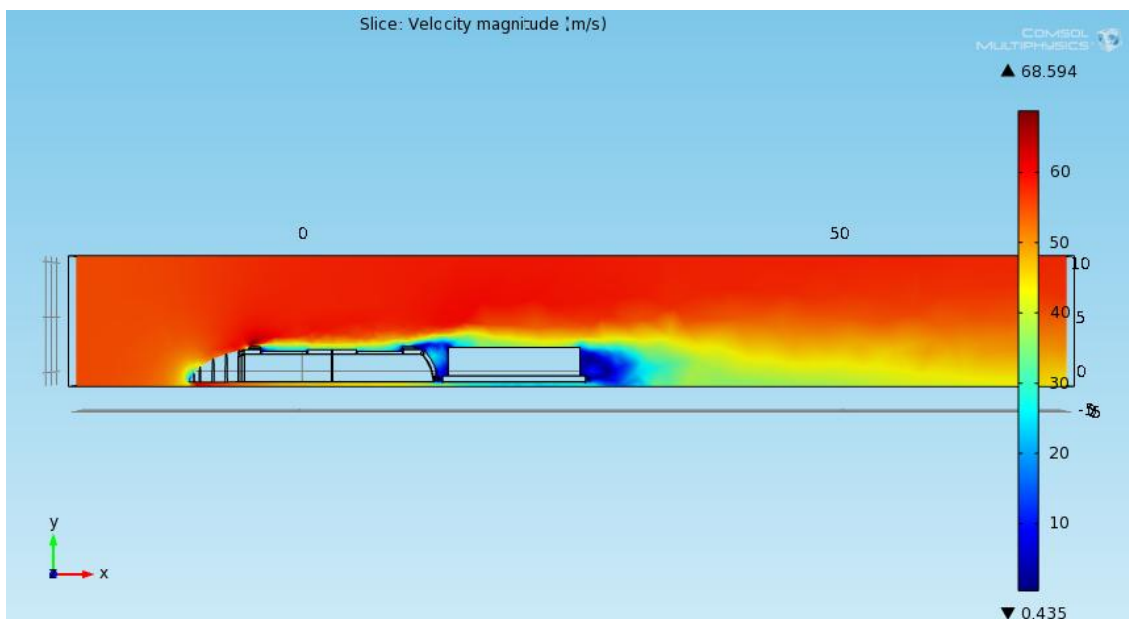


Fig. B.15. Velocitats del Shinkansen A-300 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

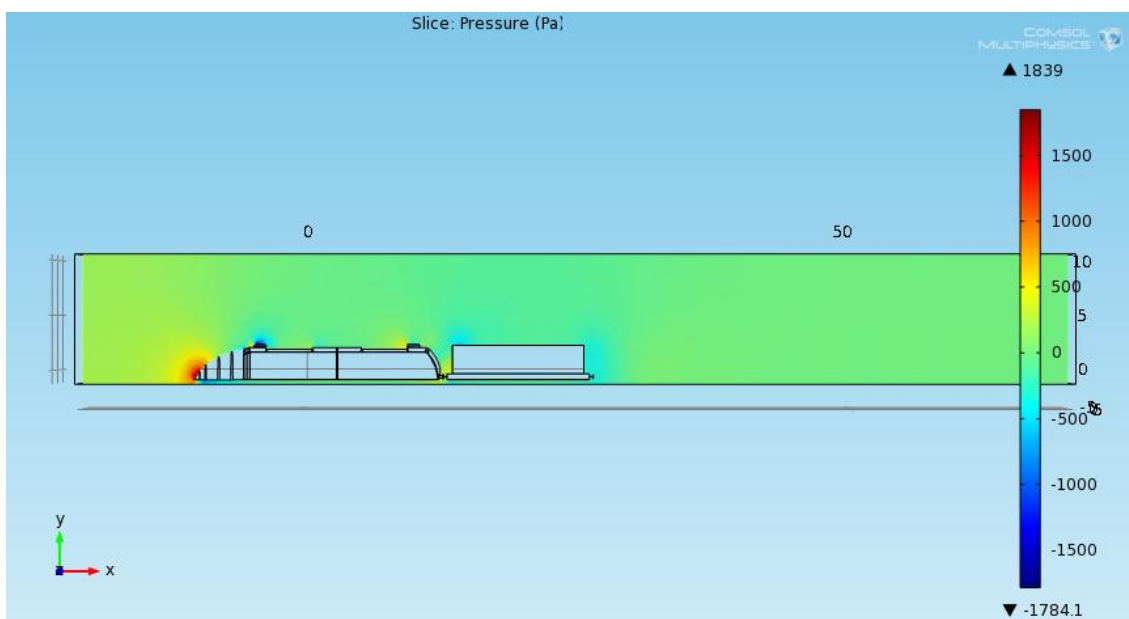


Fig. B.16. Pressions del Shinkansen A-300 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.



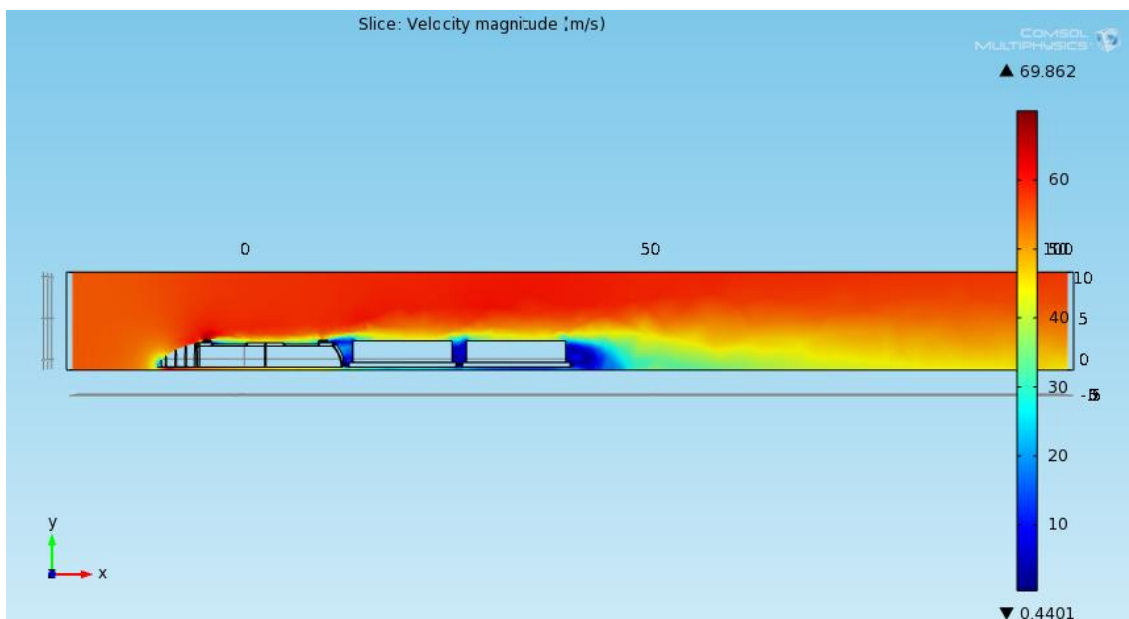


Fig. B.17. Velocitats del Shinkansen A-300 amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

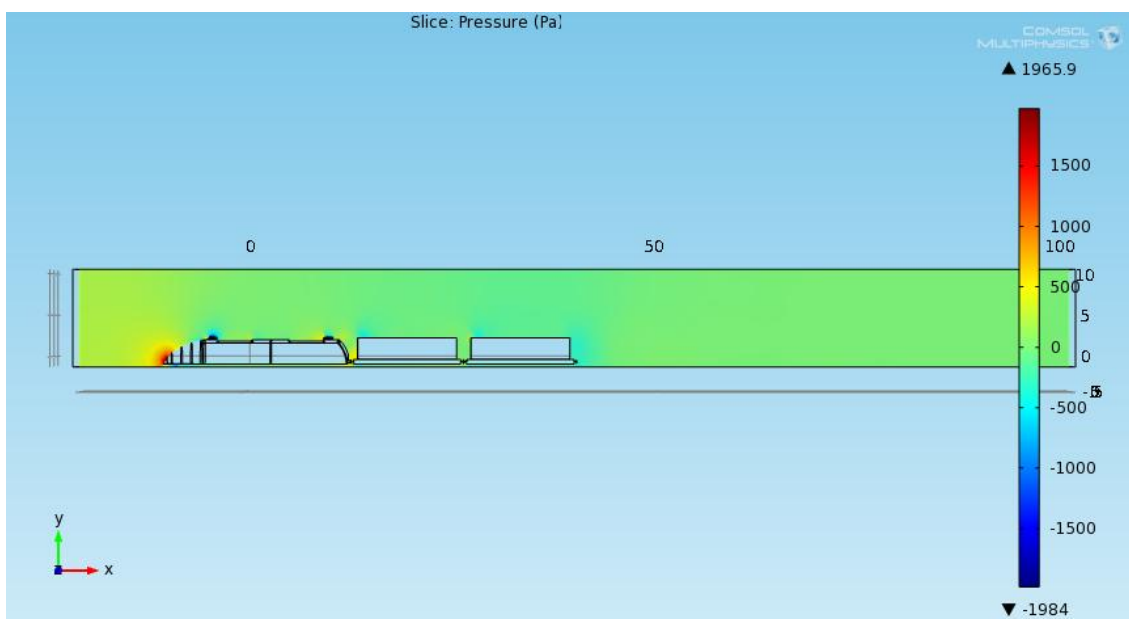


Fig. B.18. Pressions del Shinkansen A-300 amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

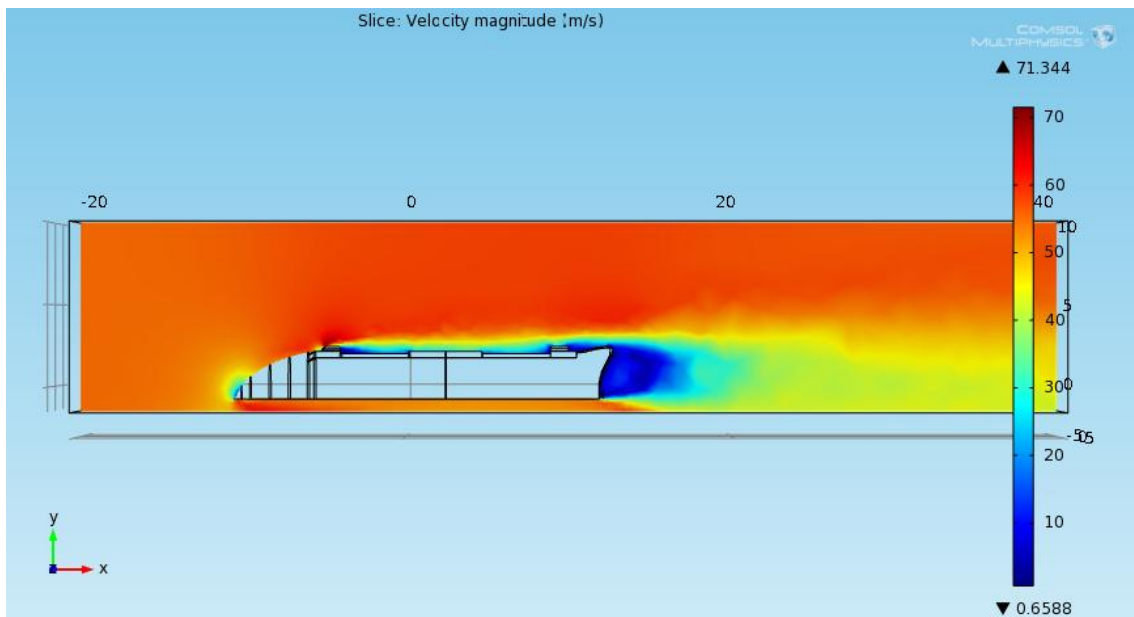


Fig. B.19. Velocitats del Shinkansen A-300 amb cua. Font: COMSOL Multiphysics.

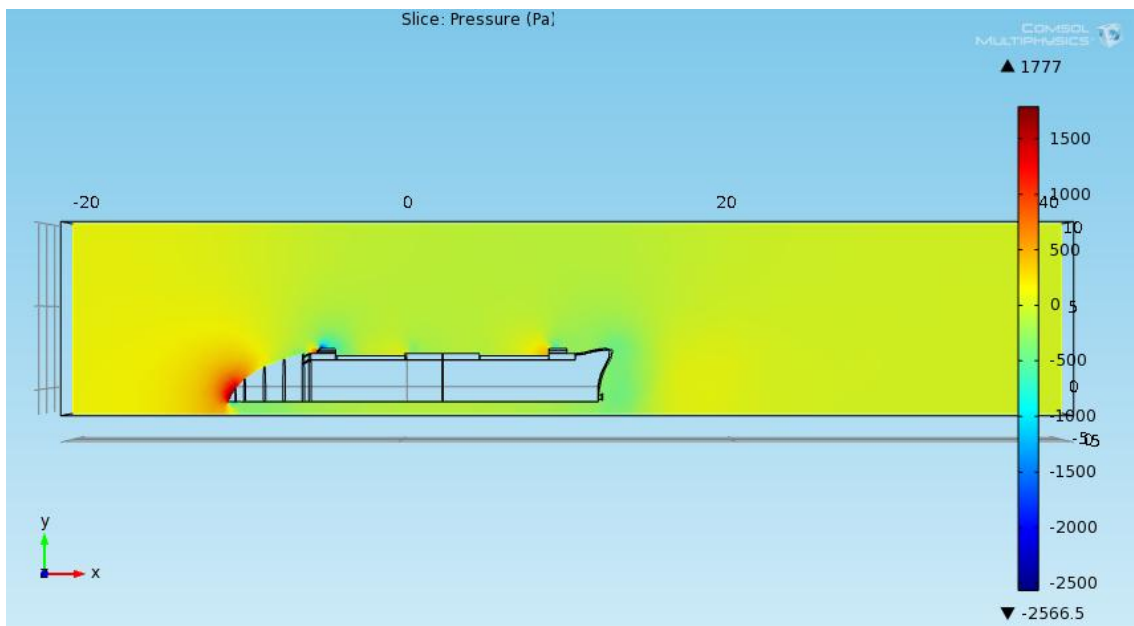


Fig. B.20. Pressions del Shinkansen A-300 amb cua. Font: COMSOL Multiphysics.



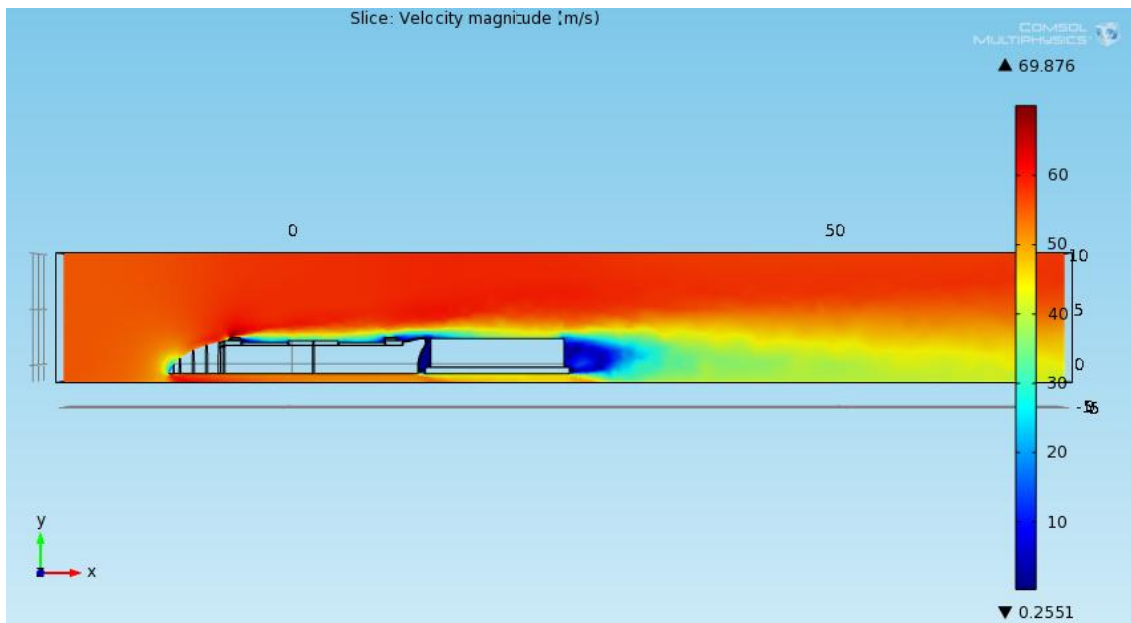


Fig. B.21. Velocitats del Shinkansen A-300 amb cua i un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

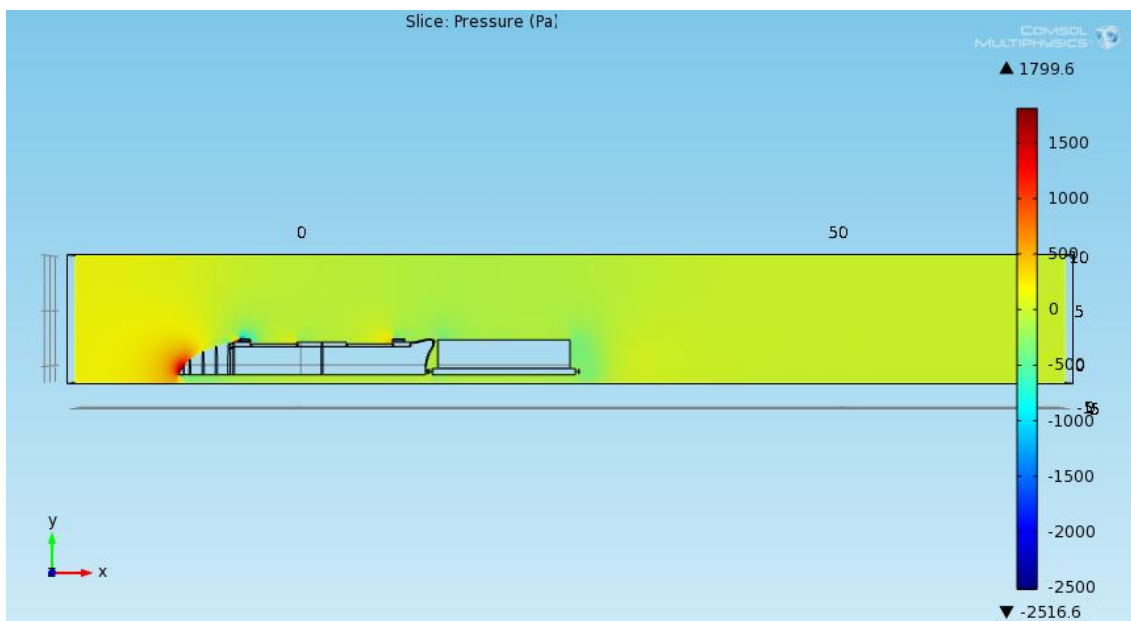


Fig. B.22. Pressions del Shinkansen A-300 amb cua i un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

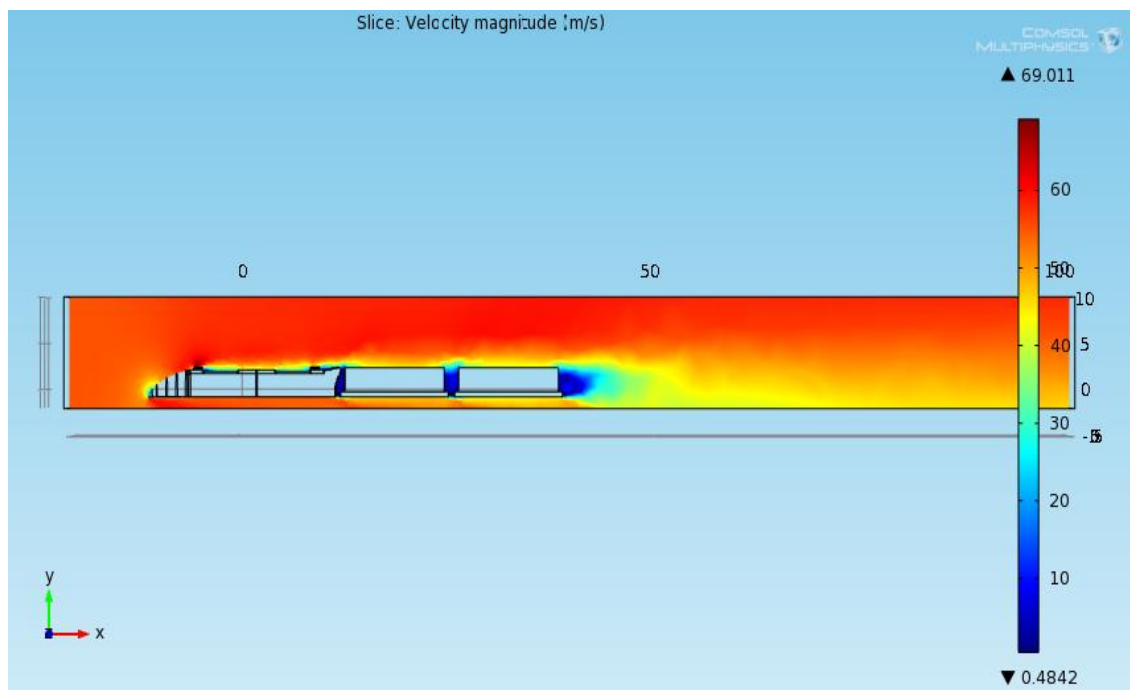


Fig. B.10. Velocitats del Shinkansen A-300 amb cua i dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

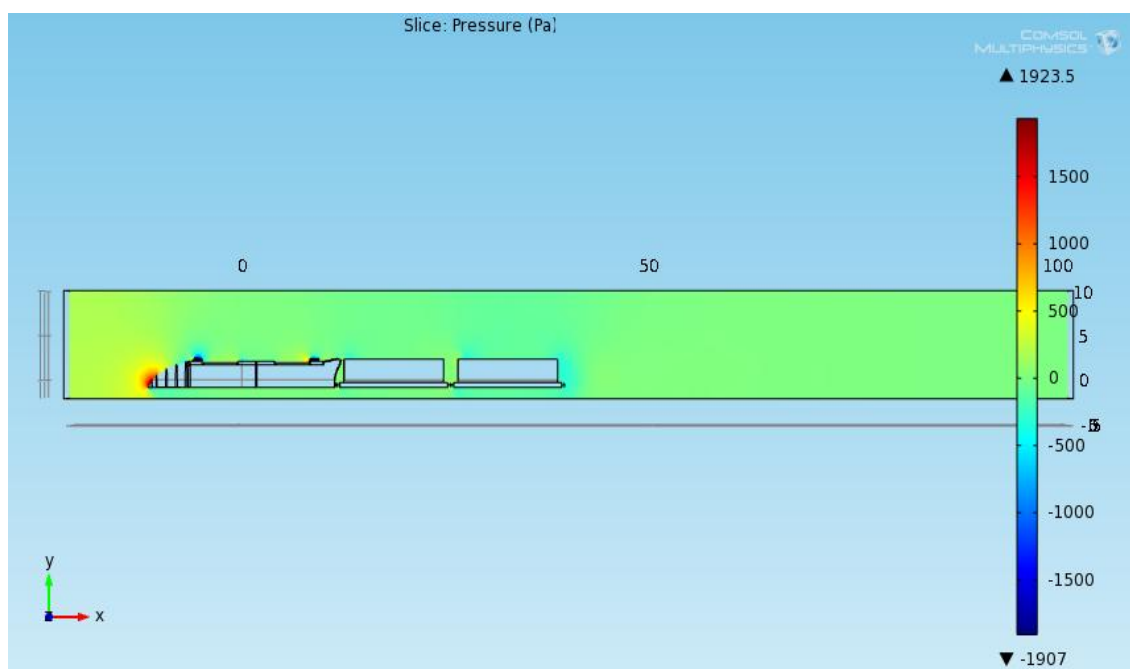


Fig. B.24. Pressions del Shinkansen A-300 amb cua i dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.



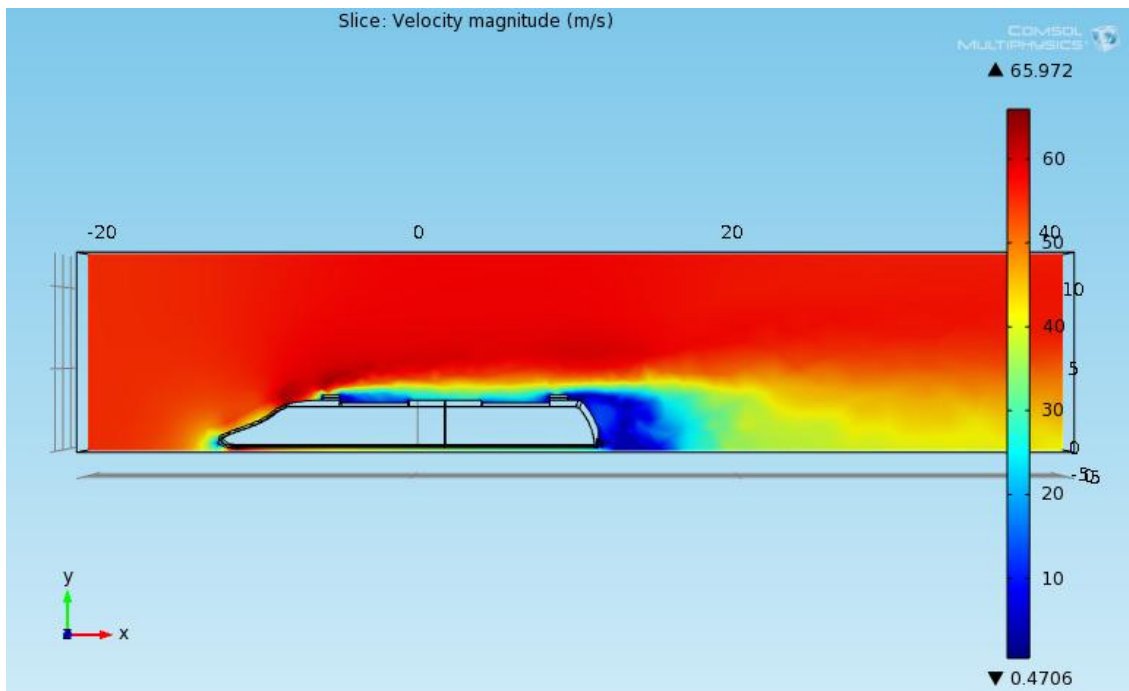


Fig. B.25. Velocitats del disseny propi. Font: COMSOL Multiphysics.

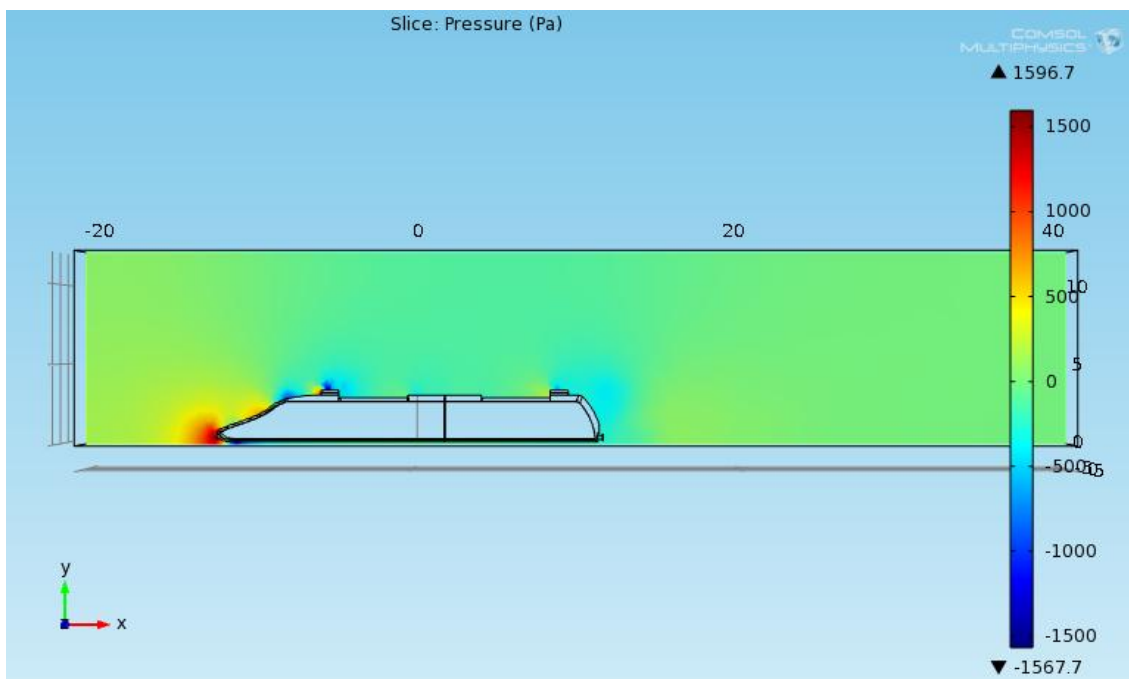


Fig. B.11. Pressions del disseny propi. Font: COMSOL Multiphysics.

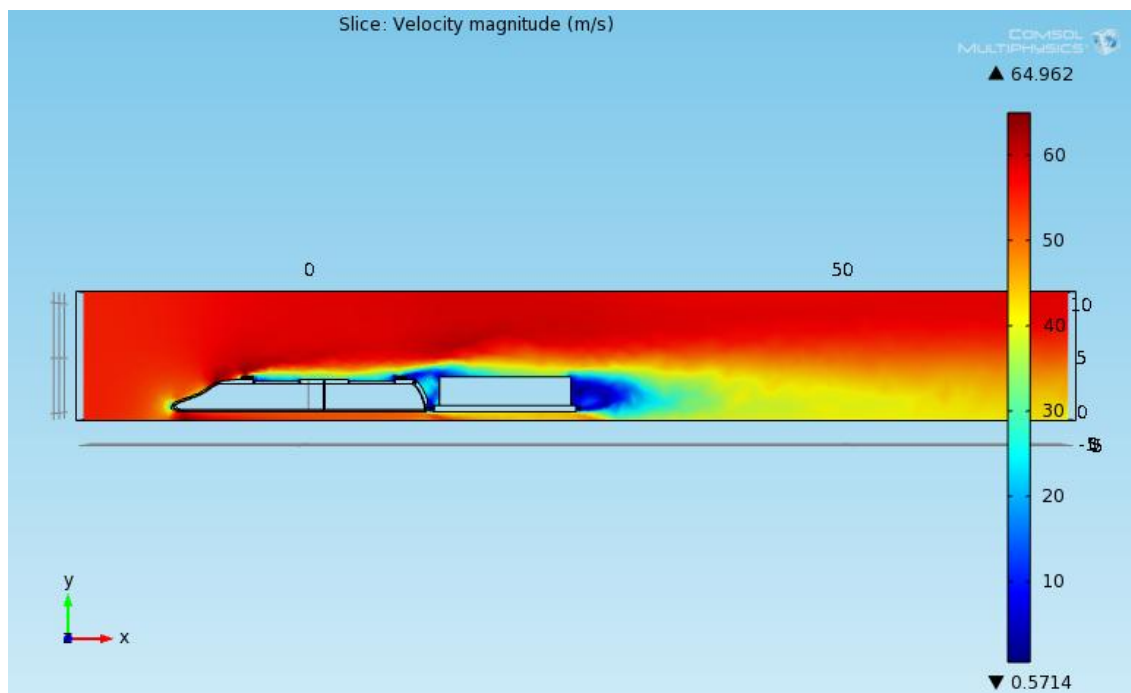


Fig. B.27. Velocitats del disseny propi amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.

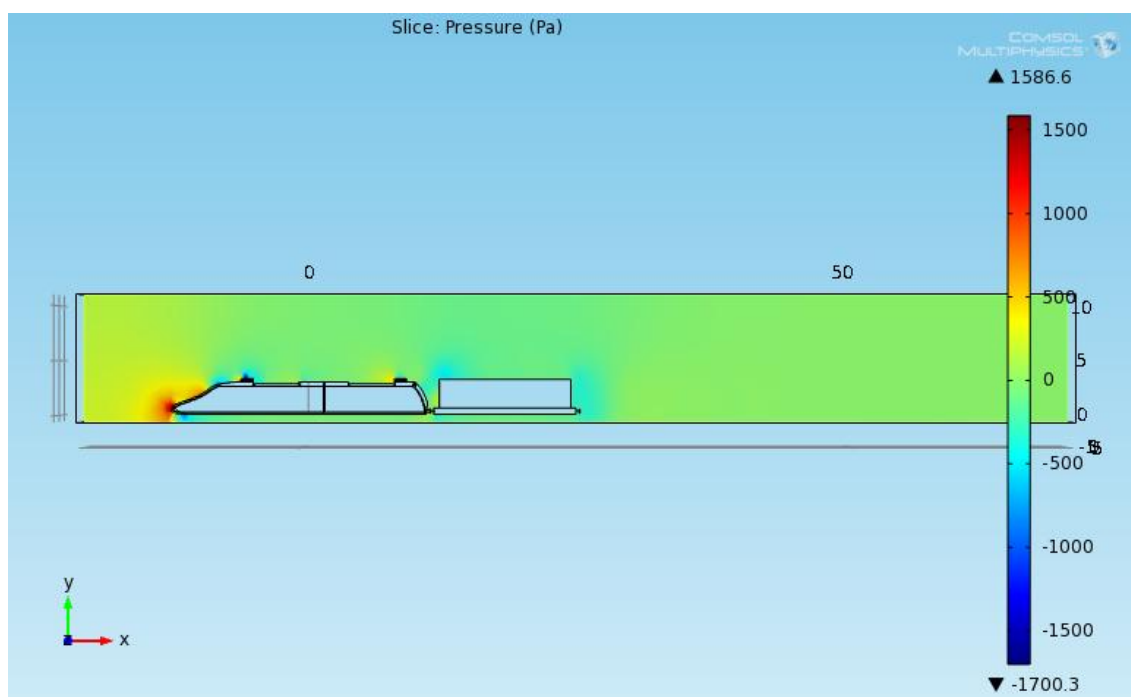


Fig. B.28. Pressions del disseny propi amb un vagó. Font: COMSOL Multiphysics.



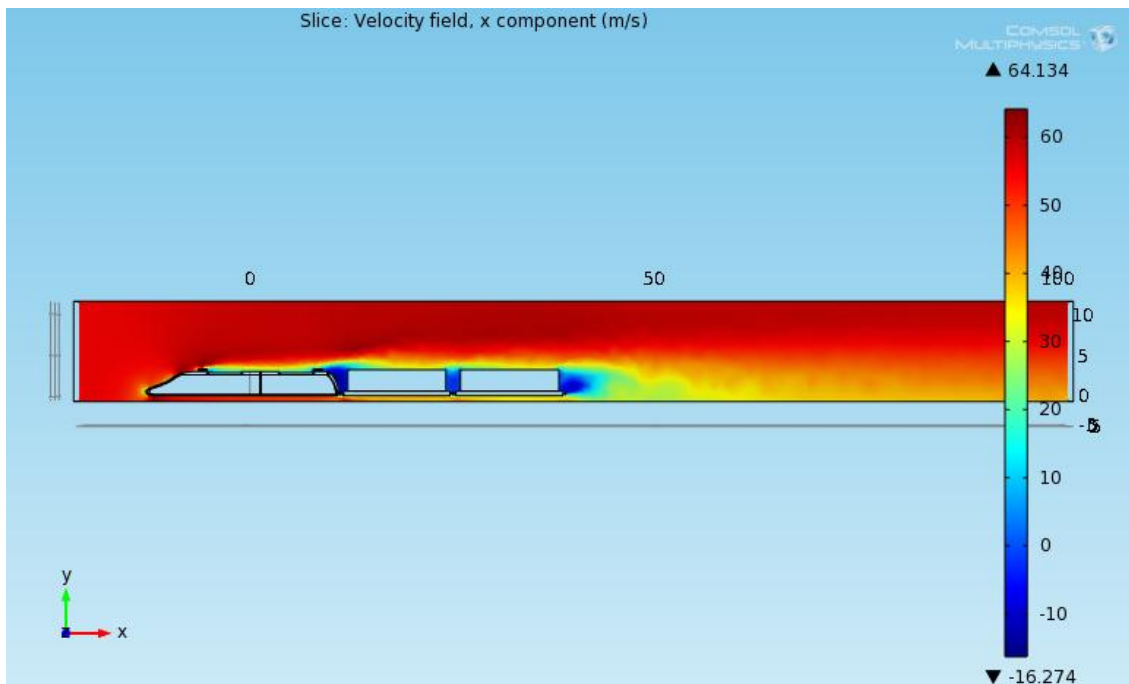


Fig. B.29. Velocitats del disseny propi amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.

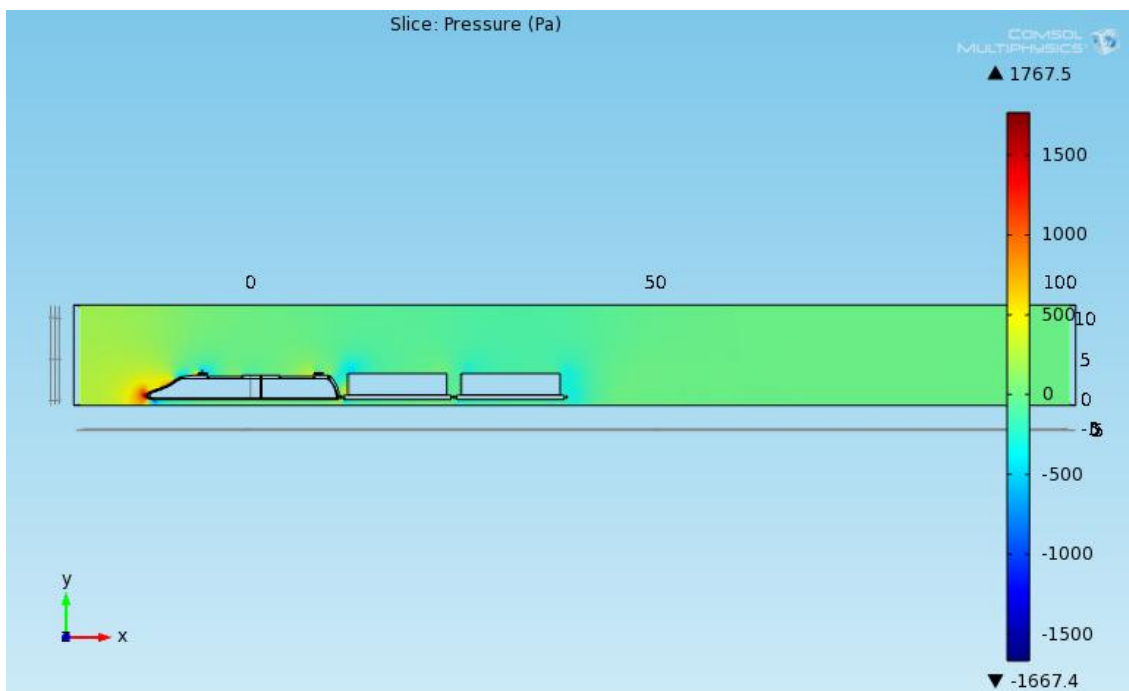


Fig. B.30. Pressions del disseny propi amb dos vagons. Font: COMSOL Multiphysics.



C. Compatibilitat del software emprat

C.1. SolidWorks

C.1.1. Requisits del sistema

Els requisits comuns per a totes les plataformes són:

- Unitat de DVD per a la instal·lació
- 2 GB de memòria
- 5 GB d'espai de disc

C.1.2. Arxius externs compatibles

Els arxius que compatibilitzen amb el SolidWorks són:

- Mastercam (.mcx)
- Cimatron (.cmt)

C.2. COMSOL Multiphysics

C.2.1. Requisits del sistema

Els requisits comuns per a totes les plataformes són:

- Unitat de DVD per a la instal·lació
- TCP/IP activat
- 1GB de memòria (preferiblement més)
- 1-4GB d'espai de disc, depenent dels productes llicenciats i les opcions d'instal·lació

C.2.2. Arxius externs compatibles

Els arxius que compatibilitzen amb la plataforma COMSOL són:

- SolidWorks (.sldprt, .sldasm)
- Pro/ENGINEER (.prt, .asm)
- Autodesk Inventor (.ipt, .iam)
- DXF (.dxf)
- Parasolid (.x_t, .xmt_txt, .x_b, .xmt_bin)
- ACIS (.sat, .sab)
- Step (.STEP)
- IGES (.IGES)
- CATIA V5 (.CATPart, .CATProduct)
- VRML, v I (.vrml, .vrl)



Bibliografia

<http://www.ecotransit.org/>

<http://www.comsol.com/products/multiphysics/>

<http://www.solidworks.es/>

<http://www.endesaonline.com/ES>