



EL RUSC

La meva muntanya russa

Estudi de la tecnologia, la física i la mecànica a partir del disseny d'una muntanya russa.

Autor:

Pseudònim: Mr. W314

Curs: 2n de Batxillerat

Any: 2021-2022

Tutor:

Centre:

Localitat: Catalunya

Als meus pares.

ABSTRACT

Partint d'un gran interès per tot el que ens envolta i el món tecnològic-físic, he decidit dissenyar una muntanya russa, fer-ne càlculs d'alçades, velocitats, forces,... i imprimir-la en 3D per tal de comprovar que les operacions han estat correctes i el recorregut es pot completar.

A partir d'aquest objectiu s'han estudiat els diferents tipus d'atraccions, les diverses formes que podien seguir els raïls, les variades vagonetes existents i a partir d'això he dissenyat una muntanya russa, partint des de zero.

Ha estat una experiència molt enriquidora. He obtingut tota mena de coneixements i he après a trobar solucions quan tenia un problema.

Based on a great interest in everything around us and the technological-physical world, I have decided to design a roller coaster, make calculations of its height, speed, strength,... and print it in 3D in order to check that the operations have been done correctly and that the route can be completed.

As an starting point, different types of attractions have been studied, the different shapes that the rails could follow, the different existing cars and after this, the rollercoaster has been designed, starting from scratch.

It has been a very enriching experience. I gained all kinds of knowledge and learned to find creative solutions when I had a difficulty.

TAULA DE CONTINGUTS

INTRODUCCIÓ	6
Tria del tema	6
Objectius	6
Estructura del treball	7
Planificació	7
1. QUÈ ÉS UNA MUNTANYA RUSSA?.....	8
1.1 Història	8
1.2 Classificació	10
1.2.1 Material	10
1.2.2 Llançament	13
1.2.3 Col·locació del passatger	16
1.3 Components	17
1.3.1 Raïls	17
1.3.2 Vagó	17
1.3.3 Estructura	18
1.3.4 Elements de la trajectòria.....	18
1.3.5 Tren de frenada	23
1.3.6 Estació	24
1.4 Muntanyes de rècord!.....	24
1.4.1 Alçada.....	25
1.4.2 Velocitat	25
1.4.3 Inversions	25
1.4.4 Llargada.....	26
2. CONCEPTES TÈCNICS	27
2.1 Forces	27
2.1.1 Forces G	27
2.1.2 Força de la gravetat	29
2.1.3 Principi fonamental de la dinàmica.....	29
2.1.4 Pes	30
2.1.5 Força normal.....	30
2.2 Energies	30
2.2.1 Energia potencial	30
2.2.2 Energia cinètica	30
2.2.3 Energia mecànica	31

2.2.4 Conservació de l'energia.....	31
2.2.5 Fregament	31
2.2.6 Fricció de fluids	32
2.3 Acceleracions	32
2.3.1 Acceleració tangencial	32
2.3.2 Acceleració normal o centrípeta.....	33
2.4 Geometria	33
2.4.1 Teorema de Pitàgores.....	33
2.4.2 Raons trigonomètriques	33
2.5 Normativa.....	34
2.5.1 IAAPA	34
2.5.2 ASTM.....	34
2.5.3 Normes bàsiques	35
2.6 Programari	37
2.6.1 Discord	37
2.6.2 NoLimits2 (NL2).....	37
2.6.3 Excel.....	38
2.6.4 Python	38
2.6.5 SolidWorks.....	38
2.6.6 Cura.....	39
2.6.7 Word	39
2.6.8 Premiere Pro.....	39
3. DISSENY DE LA MUNTANYA RUSSA.....	40
3.1 Metodologia.....	40
3.2 Fonts d'inspiració	40
3.2.1 Shambala, a PortAventura, Catalunya	40
3.2.2 Steel Force i Nitro, Estats Units, i Goliath, Països baixos.....	40
3.2.3 The Smiler, a Alton Towers, Regne Unit	41
3.3 El nom.....	42
3.4 Recorregut	43
3.4.1 Estació.....	45
3.4.2 Pujada	46
3.4.3 Baixada.....	46
3.4.4 Looping.....	46
3.4.5 Corba.....	46
3.4.6 Turonets	46
3.4.7 Zona de frenada.....	46

3.4.8 Característiques del recorregut.....	46
3.5 Càlculs	47
3.5.1 Velocitat.....	48
3.5.2 Forces G.....	55
3.5.3 Anàlisi dels resultats	61
3.6 Disseny d'elements	66
3.6.1 Raïls	66
3.6.2 Suports	69
3.6.3 Vagó	70
3.7 Construcció de la maqueta.....	73
3.8 Problemes	77
3.8.1 Problemes d'escala.....	77
3.8.2 Radi curvatura	78
3.8.3 Forces G Excel	79
3.8.4 Peralt	80
3.8.5 Python	80
3.9 Resultat final	81
3.10 Pressupost	82
4. VALORACIÓ PERSONAL/CONCLUSIÓ.....	83
5. AGRAÏMENTS	84
6. TAULES DE CONTINGUTS	85
6.1 Fotografies	85
6.2 Taules	88
6.3 Gràfics.....	89
6.4 Webgrafia.....	90
6.5 Vídeos.....	93

ANNEXES

1. ANNEX I - FOTOGRAFIES DE LA MUNTANYA	2
2. ANNEX II - VIDEOS.....	6
6.1 Video del disseny original.....	6
6.2 Video de la versió 2.....	6
6.3 Video del disseny amb paisatge	6
6.4 Video promocional.....	6
6.5 Video Python.....	6
3. ANNEX III - CODIS DE PHYTON	7
3.1 Velocitats, acceleracions i forces G.....	7
3.2 Gràfics de colors forces G linials (Colorscheme 1)	9
3.3 Gràfics de colors forces G verticals (Colorscheme 2)	12
3.4 Gràfics de colors velocitat (Colorscheme 3)	15
3.5 Gràfic 3D.....	18
3.6 Moviment d'un punt simulant el vagó.....	20
3.7 Font d'Excel necessària	23
4. ANNEX IV – TRAMS DEL RECORREGUT.....	67
5. ANNEX V - NÚMERO DE PECES	78
6. ANNEX VI- DIARI DE RECERCA	79
7. ANNEX VII - ENTREVISTES	94
8.1 Dan Fritsche.....	94
8.2 Martí Guijarro	97
8. ANNEX VIII - TAULES DE DADES.....	100
2.1 Punts de recorregut importats de NL2, angle i distància.....	100
2.2 Càlcul de les força normal per a cada punt.....	138
2.3 Càlcul de velocitat i energies.....	176

INTRODUCCIÓ

Tria del tema

La meva fascinació pel món em duu, dia rere dia, a formular-me immensitats de preguntes, algunes inexplicables o fins i tot absurdes! Entre aquesta multitud de qüestions que em faig, de tant en tant n'extrec coneixements o ganes de conèixer.

Un cop vaig tenir l'assignació d'escollir un tema pel meu treball de recerca, vaig obrir la meva capsa de pandora i vaig buscar quelcom que m'escaigués.

A causa de la meva admiració cap al món tecnològic, sempre m'havia preguntat com funcionen les muntanyes russes, i quin o quins principis seguien per tal de completar tot el recorregut. Ja partia d'una petita base de coneixements, com algunes nocions d'energia i forces, però no m'hagués imaginat mai el munt de processos i conceptes que intervenen en una muntanya russa.

Sí que és cert que no tinc una passió extrema per les muntanyes russes, no obstant les considero fascinants, increïbles i dignes d'estudi.

Objectius

El principal objectiu d'aquest treball és descobrir, conèixer i aprendre sobre el món que ens envolta.

M'agradaria comprendre l'attractiu i complex món de les muntanyes russes, des del seu funcionament, les normatives, el mecanisme de funcionament,..., fins a emmirallar-me en les muntanyes actuals per saber com funcionen i el perquè de cada disseny, sensacions del passatger, limitacions, problemes...

Ahora realitzar un treball formal, sense un excés de dades, fórmules, números ni informació que el faci avorrit. Que sigui comprensible per tothom, o almenys intentar-ho.

A partir dels coneixements obtinguts, crearé la meva pròpia muntanya, a imaginació meua i que funcioni, per comprovar que la feina ha estat ben feta. D'aquesta muntanya se'n realitzaran càlculs de cinemàtica i dinàmica, forces, velocitats, acceleracions,..., partint dels conceptes apresos a les assignatures de batxillerat.

Per poder-ho fer, em caldran moltes hores d'ordinador, aprenent com funcionen els diferents programes que empraré per al treball.

Per tant, el resultat final serà el disseny d'una muntanya russa i la seva maqueta a escala reduïda.

En definitiva, tot un repte, però amb ganes d'aconseguir-ho!

Estructura del treball

Aquest treball està estructurat en dues parts, una de teòrica i una de més pràctica.

Marc teòric:

- Una breu introducció històrica, per saber d'on es parteix.
- Definició de conceptes, per assegurar coneixements i tenir certesa que s'entendrà la totalitat del treball.

Marc pràctic:

- Disseny d'una muntanya russa amb diversos programes i l'explicació del funcionament de cada un i els seus usos.
- Realització de tota mena de càlculs, amb relació a les forces.
- Explicació del perquè de les decisions preses al llarg del treball.
- En els annexos s'adjunten els gràfics, càlculs, taules d'Excel plenes de dades, el disseny de les peces, a més del diari de recerca i extres.

Planificació

APARTATS	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Gen
Conceptes previs	■										
Apartat teòric					■						
Càlculs					■					■	
Recorregut					■						
Modelatge						■				■	
Impressió 3D							■		■		
Muntatge											■
Extres visuals											■
Edició TDR											■

1. QUÈ ÉS UNA MUNTANYA RUSSA?

Una muntanya russa és un giny mecànic utilitzat pel divertiment de les persones.

Hi ha infinitat de muntanyes russes diferents: unes construïdes de metall, d'altres de fusta, o fins i tot una mica d'ambdues; unes amb recorreguts més llargs, d'altres amb més *loopings*,..., però totes tenen coses en comú: Uns rails per on llisquen els vagons amb els passatgers en el seu interior.

1.1 Història

L'origen de les muntanyes russes és incert, tot i que es creu que va ser entre els segles XVII i XVIII, a Sant Petersburg, Rússia. Els habitants d'aquesta població, durant els avorrits i feixucs mesos d'hivern, pujaven dalt d'unes petites construccions recobertes de neu i gel i es llençaven aprofitant el lliscament i el pendent.

És degut al seu lloc d'origen que en diversos idiomes, com ara el francès, l'italià, el castellà o el català que s'anomenen muntanyes russes.



Fotografia 1: Les muntanyes russes

Font: <https://science.howstuffworks.com/engineering/structural/roller-coaster1.htm>

La idea ràpidament es va expandir per Europa. El juliol del 1817, Nicolas Beaujon, un banquer francès, va obrir el Parc Beaujon, un parc d'atraccions que destacava per la *Promenades Aériennes* (Passejades aèries).

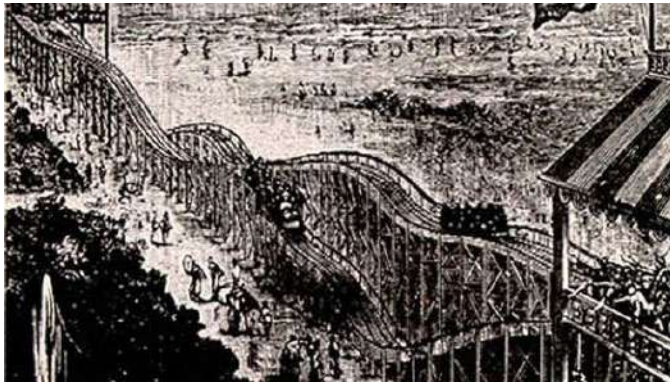
L'atracció incloïa cotxes de rodes ben aferrats a la pista, que eren remolcats a la part superior d'una torre on, a continuació, es deixaven anar per baixar a través de dues vies corbes a banda i banda.

És considerada la primera muntanya russa amb un circuit tancat.



Fotografia 2: Promenades Aériennes

Font: <https://histoire-image.org/fr/etudes/promenades-aeriennes>



Fotografia 3: Switchback

Font: <https://newyork.cbslocal.com/2014/06/16/130-years-ago-monday-first-u-s-roller-coaster-opens-at-coney-island/>

Les empreses es van afanyar a industrialitzar la idea.

El 1884, l'inventor LaMarcus Adna Thompson va construir el ferrocarril de *Switchback*, a Nova York.

La seva popularitat, tot i només fer una alçada de 15 metres, va significar l'inici de l'era de les muntanyes russes als Estats Units.

Per tal de commoure i fer sentir noves emocions als passatgers, el 1895 va obrir la primera muntanya amb un looping vertical, de l'anglès *vertical loop*. Va ser a Nova York amb nom de *Flip Flap Railway*.

Fou la primera muntanya russa que posava cap per avall els seus passatgers.

A causa dels pocs instruments de mesura dels que es disposava, no es van adonar que els passatgers patien un excés de forces G, el que els provocava nàusees, mareigs, pèrdua de la visió,...., ja que la sang no els hi arribava al cervell.



Fotografia 4: Flip Flap Railway

Font: <https://www.youtube.com/watch?v=nLP1z6-nhZw/>

Les muntanyes russes van patir un fort increment en la popularitat arreu. Se'n van construir moltes durant el final del segle XVIII i principis del segle XIV.



Fotografia 5: Matterhorn Bobsleds

Font: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_roller_coaster

Tot i això, no va ser fins a l'arribada del metall al sector que l'activitat es va reactivar. El 1959 Disneyland, als Estats Units, va introduir la primera muntanya que usava tubs d'acer per formar els raïls, anomenada Matterhorn Bobsleds.

L'acer, a diferència de la fusta, pot ser doblegat en totes direccions i crear circuits trepidants amb *loopings*, *corkscrews* (tirabuixons) i moltes altres figures esbojarrades!

Amb l'arribada d'aquest nou material a la indústria, les muntanyes han evolucionat a pas de gegant. Any rere any es batien nous rècords. Els avenços en l'enginyeria també propicien aquestes evolucions. Millores estructurals, més precisió en els càlculs,...

I quin és el futur de les muntanyes russes? Més alçades, més distància, seients flotants, un viatge molt més suau,... tota una incògnita!

1.2 Classificació

Les muntanyes russes es poden classificar segons diferents criteris com són:

- el material de construcció.
- el tipus de llançament.
- el tipus de subjecció.

1.2.1 Material

Tota muntanya russa es pot classificar segons el seu material de fabricació: fusta o metall.

Segons la base de dades de les muntanyes russes hi ha aproximadament 3800 muntanyes russes operatives arreu del món, de les quals només 180, menys del 5%, són de fusta.



Taula 1: Comparativa entre les muntanyes russes d'acer i de fusta

1.2.1.1 Muntanyes russes de fusta

Una muntanya russa de fusta, com el seu nom indica, té una estructura i uns raïls de fusta. No obstant, les vies estan folrades de làmines d'acer, ja que així els vagons circulen millor.

Les estructures que sostenen una muntanya russa de fusta són immenses, en comparació amb les d'acer. Això provoca un elevat cost de fabricació i construcció, a més d'un alt risc d'incendi.

Les muntanyes de fusta modernes, gràcies als seus raïls i acabats d'acer permeten realitzar figures extremes i posar cap per avall als passatgers.

Degut al poc modelatge de la fusta, aquesta tipologia de muntanyes russes no poden realitzar corbes molt pronunciades ni amb un peralt molt elevat.

Tot i aplicar més volum de material, el cost de les muntanyes russes de fusta és més barat.



Fotografia 6: Muntanya de fusta

Font:

<https://thegravitygroup.com/portfolio/jungle-trailblazer/>

1.2.1.2 Muntanyes russes d'acer

Una muntanya russa d'acer és aquella que la seva pista està feta d'acer.

Aquest estil de muntanyes ha guanyat molta popularitat en l'actualitat perquè pot proporcionar un viatge més suau i ràpid amb més inversions i figures que desafien les lleis de la gravetat.

També destaquen per ser estructures menys voluminoses. En utilitzar pilars estructurals únics permeten una estructura més buida i neta, afegint un al·licient extra per l'espectador, que veu el recorregut de la muntanya des de l'exterior.



Fotografia 7: Muntanya d'acer

Font: <https://www.coaster101.com/2019/12/13/top-10-steel-coasters-of-the-2010s-decade-attraction-awards/>

Dins de les muntanyes russes d'acer es poden diferenciar segons els tipus d'esquelet o estructura que uneix els raïls. En destaquen 4 tipus:

- Wild Mouse (Flat Track).
- Bollinger & Mabillard (Box Track).
- Intamin i Gerstlauer Eurofighter (Skeleton Track).
- Rocky Mountain (Unique Track).

1.2.1.2.1 Wild mouse (FLAT TRACK)

Esquelet basat en vies planes anomenat Flat Track.

Les muntanyes russes basades en aquest tipus d'esquelet destaquen per no tenir peralts i dur els passatgers d'un costat a l'altre de la vagoneta.

Aquestes muntanyes russes són anomenades Wild Mouse.



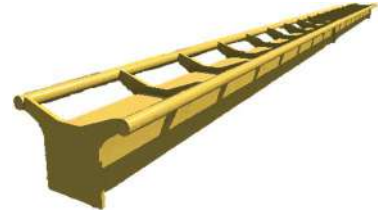
Fotografia 8: Wild Mouse esquelet
Font: Pròpia – Document NL2

1.2.1.2.2 Bolliger & Mabillard (BOX TRACK)

Esquelet anomenat Box Track que inclou un quadrat com a columna vertebral.

Les muntanyes russes basades en aquest tipus d'esquelet destaquen per un ús més acrobàtic i de velocitat.

Aquestes muntanyes russes són construïdes per l'empresa Bolliger & Mabillard.



Fotografia 9: Bolliger & Mabillard esquelet
Font: Pròpia – Document NL2

1.2.1.2.3 Intamin i Gerstlauer Eurofighter (SKELETON TRACK)

Esquelet format per vies triangulars, on cada extrem del raïl és unit amb una via inferior, anomenat Skeleton Track.

Les muntanyes russes basades en aquest tipus d'esquelet destaquen per un ús més acrobàtic.

Aquestes muntanyes russes són construïdes per l'empresa Intamin i Gerstlauer Eurofighter.



Fotografia 10: Intamin i Gerstlauer eurofighter esquelet
Font: Pròpia – Document NL2

1.2.1.2.4 Rocky Mountain (UNIQUE TRACK)

Aquest disseny és un dels últims que han aparegut al mercat. Esquelet format per un únic quadrat de ferro, permetent fer una muntanya amb una estructura poc voluminosa. També s'usen menys peces, per tant, es disminueix el pes i s'empra menys material.

També es troba la variació amb dos raïls, un per conjunt de rodaments.

S'assembla bastant a les vies d'una estructura de fusta.



Fotografia 11: Unique track esquelet
Font: Pròpia – Document NL2

1.2.2 Llançament

Totes les muntanyes disposen d'un llançament per tal de poder completar tot el recorregut.

Avui en dia, existeixen diverses maneres de dotar d'energia, per tant de velocitat, un vagó d'una atracció, de les que en destaquen:

- els acceleròmetres.
 - magnètics.
 - hidràulics.
- elevació per cadena.

1.2.2.1 Acceleròmetres

Aquest mètode accelera, en molt poc temps, els passatgers a una velocitat elevada. Els raïls inicials de l'atracció són horitzontals i rectes, per poder efectuar el tren de llançament amb més facilitat.

Els acceleròmetres són el sistema de llançament més modern i emocionant.

1.2.2.1.1 Acceleracions amb plaques magnètiques

Els primers raïls de l'inici de l'atracció estan dotats de plaques magnètiques per on passa corrent.

Aquestes plaques estan situades en paral·lel, deixant un espai entre elles. El vagó també duu una placa, normalment d'alumini a la part inferior de la vagoneta. Les plaques encaixen entre elles. En entrar en contacte es crea una força de repulsió entre els raïls i el vagó, degut al camp magnètic i progressivament augmenta la seva velocitat



Fotografia 12: Red Force, acceleració magnètica

Font:

<https://twitter.com/ThemeParkWW/status/1123884017554722824/photo/1>

En no haver-hi contacte entre els elements, es redueix la possibilitat de trencament i per tant, la necessitat de canvi cada cert període de temps.

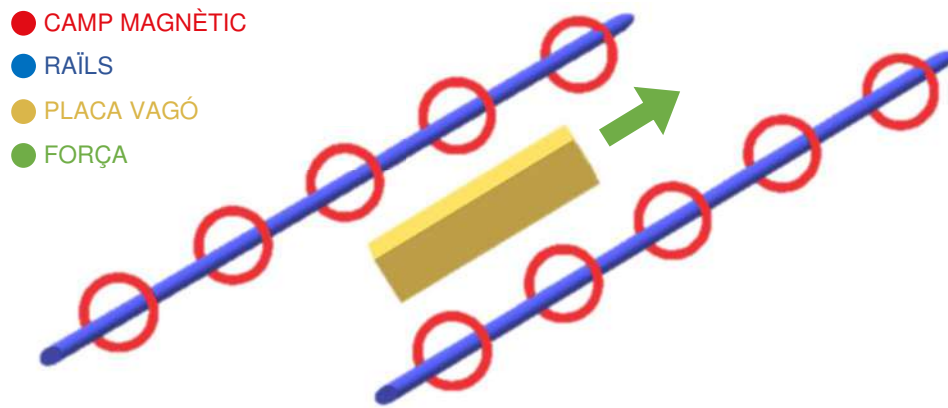
Tot i tenir un cost més elevat, a la llarga, surten més rendibles.



Fotografia 13: Esquema 1 acceleració magnètica

Font: <https://www.youtube.com/watch?v=b81qXvFLdrk>

Post editat



Fotografia 14: Esquema 2 acceleració magnètica:
Font: Pròpia – Document Paint 3D

1.2.2.1.2 Acceleracions hidràuliques

Aquesta acceleració es fa amb un motor hidràulic.

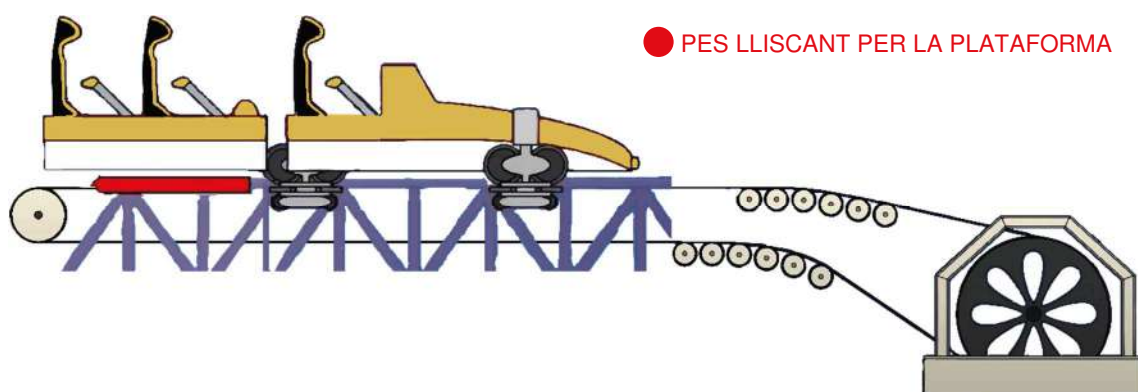
Aquest motor, de gran potència, té associat un sistema de transmissió amb un pes que llisca per la pista. Quan la vagoneta està a l'estació s'uneix a aquest pes, que li donarà la velocitat, arrossegant-la els primers metres de recorregut.

A una certa distància, el pes deixarà anar el vagó, permetent-li recórrer el circuit.



Fotografia 15: Kingda Ka, acceleració hidràulica

Font:
https://coasterpedia.net/wiki/Launched_roller_coaster



Fotografia 16: Esquema llançament hidràulic
Font: pròpia – Document Illustrator

1.2.2.2 Elevació per cadena (turó ascensor)

Localitzat al mig de les seccions de pujada, hi ha dues guies, per on hi passa una cadena. Aquesta cadena estira la vagoneta fins a la màxima alçada.

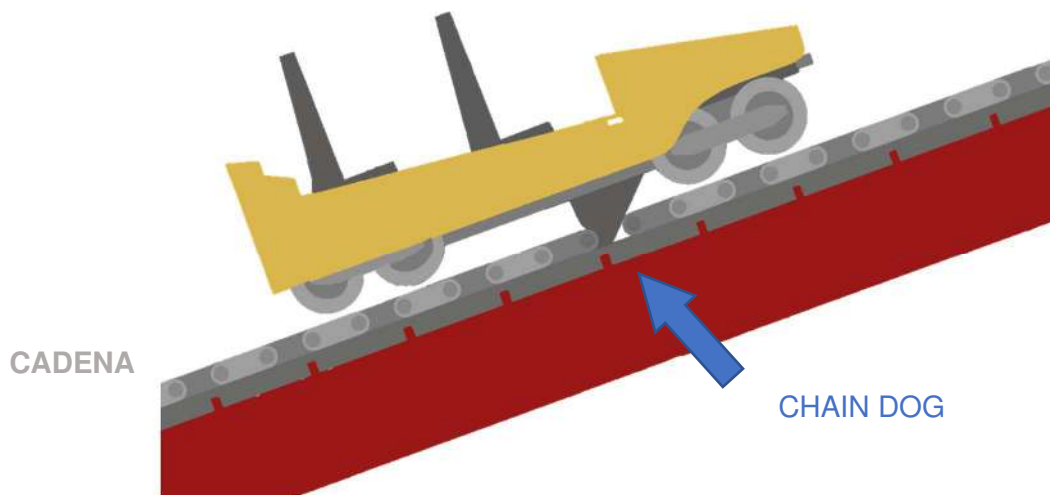
El vagó conté una part modificada en el seu interior que permet la seva unió amb la cadena. S'anomena cadena de gos, de l'anglès *chain dog*. Aquesta peça s'introdueix entremig dels forats de la cadena i, quan ja s'ha arribat a la part superior, es desenganxa.



Fotografia 17: Cadena

Font: <https://www.youtube.com/watch?v=06jLr6NVrM>

Un motor a la part inferior del raíl fa que la cadena pugui pujar i baixar, completant un circuit circular.



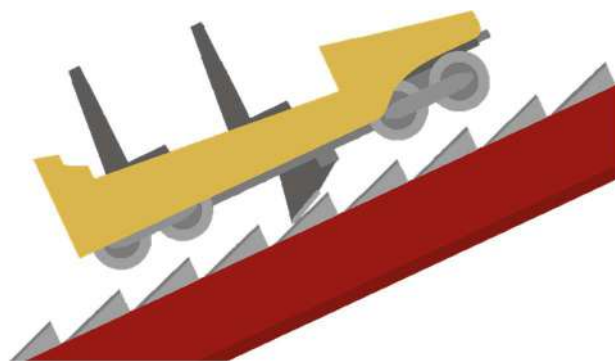
Fotografia 18: Elevació per cadena

Font: <https://www.youtube.com/watch?v=06jLr6NVrM>

Post editat

Per assegurar la seguretat dels viatgers, sota de la cadena, hi ha un sistema d'antiretorn. El moviment de seguretat produeix el clàssic soroll, *cla, cla, cla,...*, de les muntanyes amb cadena.

El sistema evita que la muntanya torni endarrere amb una mena de dents. Només aquesta mena de muntanyes tenen aquest sistema de seguretat, ja que els acceleròmetres no ho necessiten.



Fotografia 19: Sistema d'antiretorn

Font: <https://www.youtube.com/watch?v=06jLr6NVrM>

Post editat

1.2.3 Col·locació del passatger

Després dels primers accidents a les muntanyes russes, fa més de 100 anys, es va decidir aplicar algun sistema de protecció que depenia de la col·locació dels passatgers. Aquest ve determinat pel tipus d'arnesos utilitzats, i són una de les parts més importants d'una muntanya russa.

Alguns són més grans, d'altres més petits, alguns t'agafen per les espatlles,... però tots tenen la funció de mantenir-te subjecte i segur a l'atracció durant el seu transcurs. També inclouen un factor emocional, ja que no tots actuen de la mateixa manera.

Destaquen dos estils d'arnesos:

- per la cintura
- per les espatlles

1.2.3.1 Per la cintura

Les primeres versions d'arnesos per la cintura consistien en una barra d'acer que evitava que els passatgers sortissin volant. Amb el pas dels anys ha evolucionat fins a ser una sola palanca que és premuda contra el passatger i no s'eleva fins al final del recorregut.

Això li dona al passatger una llibertat total del tronc superior i li permet moure's i poder veure el que l'envolta.

Per contra, en no haver-hi molta subjecció del passatger la muntanya russa no permet realitzar moviments bruscos ni fer molts elements acrobàtics.



Fotografia 20: Arnès per la cintura

Font:

<https://www.youtube.com/watch?v=oFsLdM7miUc>

Post editat

1.2.3.2 Per les espatlles

Aquest tipus d'arnès agafa el passatger per les espatlles i el subjecta contra el seient i el respalller.

El passatger té menys llibertat de moviment, però pot realitzar recorreguts molt més trepidants i emocionants, fet que va provocar que aquest tipus d'arnesos s'implementessin ràpidament arreu.

La seva forta popularitat fa que avui en dia sigui el més emprat.



Fotografia 21: Arnès per les espatlles

Font:

<https://www.youtube.com/watch?v=oFsLdM7miUc>

Post editat

1.3 Components

En aquest capítol es descriuran els principals elements que componen una muntanya russa.

Aquests elements són:

- Raïls.
- Vagó.
- Estructura.
- Elements de la trajectòria.
- Tren de frenada.
- Estació.

1.3.1 Raïls

Els raïls són la part per on circulen els trens. Són peces de diferents materials i poden tenir diferents formes, com s'ha comentat en apartats anteriors.

En el seu disseny, és molt important el detall, ja que un desencaix o un mínim desajust pot provocar pèrdues de temps i immenses quantitats de diners.

A més a més, tota petita vibració de la via és notada pel passatger, perquè a l'anar a tanta velocitat, el seu efecte es multiplica.



Fotografia 22: Raïl

Font: https://www.freepik.es/fotos-premium/roller-coaster-track_2113222.htm

1.3.2 Vagó

El vagó és on s'ubiquen els passatgers de les muntanyes russes. Aquests s'asseuen en seients de forma còmoda i amb el seu respectiu arnès de protecció.

El disseny del seient ha de impedir que el passatger interfereixi en l'atracció en qualsevol moment, és a dir, no arribi a les rodes, sensors o punts crítics, ja que podria fer-se mal o influir en el progrés del recorregut.

La unió de diversos vagons units entre si forma un comboi o tren que viatjarà per la pista.

Normalment, tenen un primer vagó una mica diferent. Aprofiten per donar-li un toc estètic, però s'utilitza per poder ajudar els vagons a pujar i aguantar. És per això que duen rodes diferents, normalment més grosses a la part frontal.



Fotografia 23: Vagó

Font: <https://www.turckbanner.co.uk/en/rollercoaster-positioning-605.php>

1.3.3 Estructura

La funció d'aguantar tots els elements de la muntanya russa en posició dia i nit, dia rere dia, recau en l'estructura. Aquesta, amb uns fonaments enormes i molt profunds, suporten el pes de l'atracció.

Els estructuristes encarregats de dissenyar cada una d'aquestes peces d'enginyeria, s'imaginin situacions remotes i extremes, com ara fenòmens climatològics, diferències de pesos en els vagons, entre d'altres, i n'extremen les precaucions.

Igual que els raïls, els suports també necessiten un grau molt elevat de precisió, ja que han d'encaixar amb el raïl amb exactitud i perfecció. El muntatge a l'aire és molt difícil de fer i si no encaixen correctament, no es poden fer "apanyos".



Fotografia 25: Suports de fusta

Font: https://www.mlive.com/travel/2017/08/every_detail_of_steel_vengeance.html



Fotografia 24: Suports de metall

Font: <https://triblive.com/local/pittsburgh-allegeny/owner-of-kennywood-park-idlewild-and-sandcastle-opening-support-office-in-pittsburgh/>

1.3.4 Elements de la trajectòria

Avui en dia existeixen milers de muntanyes russes i totes elles són úniques. La diferència principal és el seu recorregut i els seus respectius elements. Cada dissenyador i companyia aplica el seu toc personal al disseny.

Cada vegada, i gràcies a la innovació de la tecnologia, es creen elements més complexes i emocionants.

Tot seguit es destaquen alguns elements (*):

- Gir amb peralt.
- Gir amb molt peralt.
- Turonet.
- Minituronets.
- Part màxima.
- Looping.
- Tirabuixó.
- Gir en 0Gs.
- Gir cobra.
- Gir banana.

(*) alguns noms han estat adaptats de l'anglès al català a conveniència i a invenció de l'autor.

1.3.4.1 Gir amb peralt (Banked turn)

Corba inclinada transversalment cap a l'interior.

A causa de les fortes forces a les quals està sotmès un passatger en aquest tipus d'element és molt convenient peraltar les corbes de la muntanya.

Això permet que el sentiment que experimenta el passatger sigui molt més suau.



Fotografia 26: Corba peraltada

Font:

<https://www.flickr.com/photos/portugepunk/111620513>

1.3.4.2 Gir amb molt peralt (Over-banked turn)

Element similar a l'anterior però amb més inclinació. Només els diferencia que en aquest cas la muntanya té un peralt que supera els 90 graus.

Tot i això, no es posa el passatger cap per avall en cap moment.



Fotografia 27: Corba superperaltada

Font: <https://www.ultimaterollercoaster.com/coasters/pictures/new-texas-giant/six-flags-over-texas-new-giant-3.shtml>

1.3.4.3 Turonet (Camelback hill)

Llarga pujada amb una forma parabòlica seguida d'una baixada pronunciada, que provoca als passatgers una sensació d'ingravedesa durant un segons en patir forces G negatives.

El passatger flota mentre el vagó passa pel punt més alt de l'element.



Fotografia 28: Turonet

Font:

<http://www.newsparcs.com/en/article/00005801-portaventura-opens-europe-s-tallest-roller-coaster-shambhala>

1.3.4.4 Minituronets (Bunny Hop)

Combinació de turonets, un darrere l'altre que provoca una sensació molt contradictòria.

Primer flotes i després ets empès contra el seient.

També és molt útil per aportar al passatger un moment de menys adrenalina i en el que pugui prendre aire.



Fotografia 29: Minituronets

Font: <http://www.coastergallery.com/sf/sfa21.html>

1.3.4.5 Part màxima (Top hat)

Element molt comú en acceleròmetres.

Consisteix en ascendir una muntanya molt elevada i quan ja pràcticament t'has quedat sense velocitat, descendir.



Fotografia 30: Top Hat

Font:

<https://spaincoaster.com/red-force-ferrari-land/>

1.3.4.6 Looping (Vertical Loop)

Volta de 360 graus en direcció vertical.

El Looping és un dels elements més típics i més utilitzats de les muntanyes russes.

A partir d'aquesta se n'han creat moltes variants com són:

- Looping inclinat.
- Looping cap avall.



Fotografia 31: Looping

Font: https://www.hive17.com/hive17_thoughts/five-fifty-the-changeable-organization

1.3.4.6.1 Looping inclinat (Inclined loop)

Looping no totalment vertical, és a dir, amb un petit grau d'inclinació.



Fotografia 32: Looping inclinat
Font: https://coasterpedia.net/wiki/Inclined_loop

1.3.4.6.2 Looping cap avall (Dive loop)

Looping on es gira el passatger a la meitat de l'element cap per avall. El vagó entra a l'element en posició normal, en la part superior el vagó es posa cap per avall, i torna a sortir en posició normal.



Fotografia 33: Looping cap avall
Font: <https://coasterforce.com/b-and-m/>

1.3.4.7 Tirabuixó (Corkscrew)

Girada de 360 graus en les que els passatgers experimenten un seguit de Loopings.

La diferència principal amb un Looping normal és que l'entrada i la sortida de l'element no estan a prop entre elles. Per aquest motiu no només és un element vertical sinó que també horitzontal.



Fotografia 34: Tirabuixó
Font: <https://coasterforce.com/corkscrew/>

1.3.4.8 Gir en 0Gs (Zero-G Roll)

És una mena de tirabuixó a la part superior d'una pujada, on el passatger experimenta un gir complet de 360 i seguidament descendeix.

El passatger experimenta un moment d'ingravedesa, a l'estar suspès en l'aire.



Fotografia 35: Zero-G Roll

Font: <https://www.youtube.com/watch?v=ZKJX7oGpi8g&t=300s>

1.3.4.9 Gir cobra (Cobra Roll)

Element amb forma de brètzels, típic pastisset alemany, que s'inicia amb mig Looping seguit d'una inversió per acabar amb un altre mig looping en el mateix sentit però en la direcció oposada, ja que aquest cop baixa.



Fotografia 36: Cobra Roll

Font: https://thisistravel.es/parque-atracciones-los-mas-atrevidos/scream_cobra_roll/

1.3.4.10 Gir banana (Banana Roll)

Element que deu al seu nom als plàtans a causa de la similitud en la forma. Semblant a un gir cobra, no obstant molt més vertical.



Fotografia 37: Banana Roll

Font: <https://www.youtube.com/watch?v=ZKJX7oGpi8g>

1.3.5 Tren de frenada

El tren de frenada és aquell element que redueix la velocitat del vagó. En alguns casos aturen el vagó, velocitat 0, i d'altres redueixen la velocitat simplement com a mesura de prevenció per poder realitzar un element.

Totes les atraccions tenen, com a mínim, un tren de frenada al final del seu recorregut.

Antigament s'utilitzaven frens de contacte, però el seu elevat desgast va provocar-ne el desús. Avui en dia els estils més emprats són:

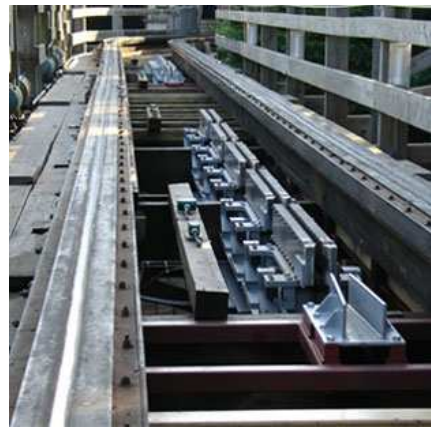
- Frens d'aleta.
- Frens magnètics.
- Frens pneumàtics.

1.3.5.1 Frens d'aleta

Sistema que incorpora en la part inferior dels vagons unes plaques que, en passar per la zona de frenada, són compreses per una mena de pinces subjectes a l'estructura.

Un sistema de sensors detecten els vagons i activa les plaques fent que freni el tren en la posició desitjada.

Això provoca una frenada brusca però efectiva.



Fotografia 38: Pinces frens d'aleta
Font: <https://parkvault.net/2018/04/18/wooden-coasters-braking-systems-part-2/>

1.3.5.2 Frens magnètics

Sistema de frenada que utilitza el mateix concepte de llançament magnètic, però invertint la força de repulsió per tal que freni en lloc d'accelerar.

Són els més econòmics i els que necessiten menys manteniment, ja que no hi ha cap mena de fregament.

Cal comentar també que no frenen el tren per complet, simplement en redueixen moltíssim la velocitat.



Fotografia 39: Frens magnètics
Font: <https://ro.facebook.com/bigsmallrollercoasterworld/photos/brakes-are-not-the-enthusiasts-preferred-element-but-they-can-look-quite-coolkra/172543877448494/>

1.3.5.3 Frens pneumàtics

Un seguit de pneumàtics, d'aquí el nom, estan disposats en mig de la trajectòria del vagó. Aquests, en fer-los rodar en sentit oposat al del vagó, per fricció el poden fer frenar.

També tenen un segon ús. En una estació, quan el tren encara no duu cap mena de velocitat i necessita arribar a l'estació de llançament, se l'ajuda a realitzar aquest curt impàs amb el mateix sistema, ara però aportant velocitat.



Fotografia 40: Frens pneumàtics

Font:

https://rollercoaster.fandom.com/wiki/Friction_Wheels?file=Tires.PNG

1.3.6 Estació

L'estació sol ser un lloc cobert on els passatgers pugen i baixen de l'atracció.

En les muntanyes més modernes hi ha uns armaris per deixar les teves pertinències perquè no et caiguin durant el recorregut.

Mentre fas les llargues i avorrides cues, solen aprofitar per introduir-te en la història amb l'ambient de la zona, per passar una estona distesa.



Fotografia 41: Estació amb molta cua

Font:

<https://twitter.com/themeparkww/status/1274647683270090754>

A la sortida s'acostuma a incorporar un espai de fotografia perquè t'enduguis un record d'aquell moment i la ganyota que has fet mentre baixaves, i ni te n'havies adonat.

D'aquesta manera, el parc rep un sobre ingrés.

1.4 Muntanyes de rècord!

Avui en dia, tenir una atracció que és la millor del món en algun aspecte proporciona al passatger una atracció extra que potencia a la gent a venir al teu parc temàtic.

També cal comentar que tots els parcs temàtics procuren destacar la seva muntanya per algun motiu o altre i hi posen més pa que formatge.

Batre rècords és cada dia més difícil i més car.

Hi ha quatre categories:

- per alçada.
- per velocitat.
- per nombre d'inversions.
- per llargada.

1.4.1 Alçada

El rècord de la muntanya més alta del planeta ha estat batut fins a 12 cops.

Actualment, la muntanya *Kingda Ka*, a Six Flags Great Adventure a Nova Jersey, sosté el rècord des del 2005 amb una alçada màxima de 139 m.

L'atracció no té massa misteri: Un acceleròmetre molt potent accelera a 206 km/h en 3,5 s. A continuació es completa un Top Hat i es retorna a l'estació. Inclou una inversió durant la baixada.

Durant un temps va ser també la muntanya més veloç del planeta, ja que alçada implica velocitat.



Fotografia 42: *Kingda Ka*, la muntanya més alta del món
Font: <https://g-switch.org/es/estados-unidos/new-jersey/kingda-ka-six-flags-great-adventure-3226523/>

1.4.2 Velocitat

El rècord de la muntanya més ràpida del planeta ha estat batut fins a 12 cops.

Cada vegada que se supera el rècord d'alçada també es baten noves marques en velocitat.

Tot i això, no és *Kingda Ka* qui sosté aquest record vigent, sinó *Formula Rossa*.

Aquesta muntanya, localitzada al Ferrari World d'Abu Dhabi, té un pic de velocitat de 240 km/h.

L'acceleròmetre, amb un potent sistema hidràulic, dispara els passatgers a l'inici de l'atracció, per poder completar el llarg recorregut de 2,2 km!

Com a curiositat, tothom que pugui a l'atracció haurà de portar ulleres per protegir-se de l'impacte d'insectes a la cara a les altes velocitats.



Fotografia 43: *Formula Rossa*, la muntanya amb una pic de velocitat més elevada del món
Font: <https://www.themeparkexperts.com/formula-rossa-la-montana-rusa-de-lanzamiento-mas-rapida-del-mundo/>

1.4.3 Inversions

El rècord de la muntanya amb més inversions ha estat batut 10 cops.

Aquest rècord és peculiar, ja que si sobrecarregues al passatger d'elements, pot provocar que no li agradi l'atracció. Per tant, s'han de cuidar molt els "tempos".

Una atracció de casa nostra, el *Dragon Khan* a PortAventura, va tenir el rècord durant un temps amb 8 inversions.

Avui en dia, *The Smiler* a Alton Towers, Regne Unit, sosté el calaix número 1 del podi amb 14 inversions.

No només destaca per la seva forma i els seus elements, sinó que també ocupa un espai ínfim. Alhora és una de les muntanyes més denses del planeta.

També té un punt d'atractiu el fet que es van creuant trens durant el recorregut. L'atracció disposa de 4 conjunts de vagonetes.



Fotografia 44: *The Smiler*, l'atracció amb més inversions del planeta
Font: <https://www.cupcakesandcoasters.com/2021/02/whats-deal-with-smiler.html>

1.4.4 Llargada

El rècord de la muntanya més alta del planeta ha estat batut fins a 4 cops.

És un rècord amb poca ambició per ser batut, ja que construir muntanyes d'aquestes magnituds és molt car i implica molt material i alhora molt manteniment.

Localitzada al Japó, al parc Nagashima Spa Land, *Steel Dragon 2000* és la muntanya més llarga del món amb un recorregut de 2479 m i una durada de 4 minuts. Sosté el rècord des dels inicis del segle.

També assoleix altes velocitats, ja que és una muntanya que s'inicia amb una forta pujada.



Fotografia 45: *Steel Dragon 2000*, muntanya més llarga del món
Font: <https://www.flickr.com/photos/russellvt/322943874>

2. CONCEPTES TÈCNICS

Durant el transcurs del recorregut d'una muntanya russa, els passatgers experimenten una combinació única de sensacions, com ser empès cap al seient o separat d'ell. Les muntanyes russes han estat construïdes per produir una multitud de sentiments. Aquests actuen diferent durant el viatge creant una experiència única.

Les muntanyes russes són atraccions basades en molts conceptes físics i càlculs matemàtics per a la seva completa realització.

En els següents apartats es fa una introducció de cadascun d'aquests conceptes i la seva influència en el disseny, així com el programari utilitzat en les diverses fases del projecte.

També s'inclou un apartat de normativa específica.

2.1 Forces

El principal objectiu a l'hora de dissenyar una muntanya russa és administrar degudament les forces sobre el vagó i el passatger. Un bon disseny farà ús de les variables de l'energia perquè el passatger se senti còmode des del primer moment fins que els vagons tornin a l'estació.

En una muntanya russa, tot són forces.

Els trens pateixen nombrosos canvis de direcció creant forces G, i es genera energia potencial en els ascensos, que posteriorment es transforma en energia cinètica en els descensos.

Tots aquests conceptes es repeteixen nombroses vegades en un mateix recorregut.

2.1.1 Forces G

Les forces G són una unitat de mesura de l'acceleració produïda per la gravetat terrestre en un objecte qualsevol. No es pot considerar una força, però implica una acceleració cap al centre de la terra. Es designa per una g minúscula i es mesura amb un acceleròmetre.

A la superfície terrestre, tenim 1g. És la força gravitacional que la Terra exerceix sobre els nostres cossos.

$$9,81 \frac{m}{s^2} = 1g$$

Les diferents forces G que actuen en una muntanya russa són:

→ Forces G lineals

Apareixen quan hi ha un increment o decrement de la velocitat.

Es nota més en el moment d'acceleració, a l'inici de la muntanya, o en el moment de frenada, al final.

Quan s'accelera ets empès contra el seient, mentre que quan frenes tendeixes a tirar-te endavant, mantenint la teva velocitat.

→ Forces G verticals

Poden ser experimentades degut a un canvi en l'elevació.

Forces G positives seran experimentades als finals de les baixades, empenyent el passatger contra el seient.

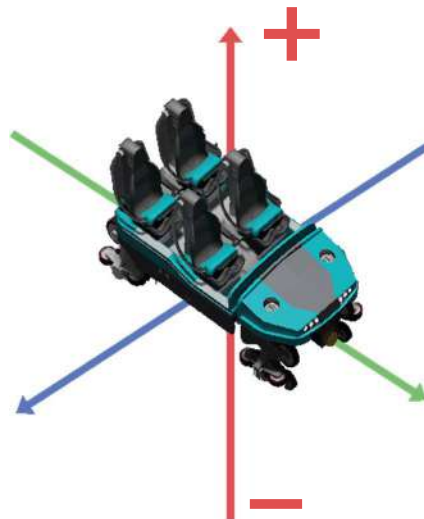
Forces G negatives seran experimentades en la part més alta d'un turonet, sempre que el vagó dugui velocitat, desprenent el passatger del seient i creant una sensació d'ingravedesa.

→ Forces G laterals

Poden ser experimentats en corbes sense peralt a una velocitat elevada.

Això provoca el moviment d'un costat a l'altre del vagó.

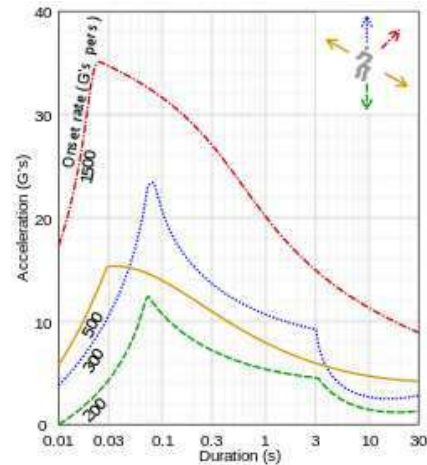
Els peralts eviten les Forces G laterals.



Fotografia 46: Direcció forces G
Font: pròpia – Document Il·lustrator

Cal tenir present que a partir de 5gs verticals, un humà sent el seu pes 5 vegades més gran i comença a patir un excés d'aquesta força. Aquest excés pot provocar mareigs o desmaís. La sang circula més lentament, cosa que provoca poca visibilitat o ceguera temporal.

Les forces Gs, fan que el pes del passatger augmenti. Per exemple, en el cas de 5g el pas es multiplica x5. Per aquest motiu, els suports de les muntanyes russes han d'estar dimensionats segons les forces G que hi interactuen.



Fotografia 47: Resistència a les forces G
Font: <https://en.wikipedia.org/wiki/G-force>

2.1.2 Força de la gravetat

La gravetat és la força d'atracció mútua que experimenten dos objectes amb massa. En aquest cas, un objecte amb la Terra.

Va ser descoberta per Isaac Newton, al segle XVII. Mentre descansava sota d'un arbre, una poma li va caure al cap. Aquest fet el va fer pensar que la poma havia sigut atreta per la massa de la Terra.

A l'escorça terrestre els cossos experimenten una acceleració de:

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$



Fotografia 48: Poma al cap de Newton
Font: <https://blocs.xtec.cat/laterraalvilot/la-gravetat/>

2.1.3 Principi fonamental de la dinàmica

També va ser Newton qui al seu llibre "Principis matemàtics de la filosofia natural" va descriure una llei molt important, el principi fonamental de la dinàmica, que diu així:

"La força resultant que actua sobre un cos és igual al producte de la massa del cos per l'acceleració que adquireix."

Representat amb la següent expressió:

$$\Sigma F = ma$$

on, ΣF és la força resultant que actua sobre el cos [N]

m és la massa del cos [kg]

a és l'acceleració del cos [m/s^2]

2.1.4 Pes

El pes és una mesura de la força amb la qual la Terra atreu un objecte cap al seu centre, degut a la força de la gravetat.

Segons la llei de la dinàmica, expressada prèviament:

$$\Sigma F = ma$$

però si apliquem aquesta mateixa fórmula, substituint l'acceleració per la gravetat de la Terra, obtenim:

$$\Sigma F = mg = 9.81 * m$$

Aquesta força s'anomena com a pes.

2.1.5 Força normal

La força normal és aquella que exerceix una superfície contra un objecte. És perpendicular a la superfície.

No hi ha cap fórmula general que la defineixi.

2.2 Energies

L'energia és la capacitat per realitzar un treball. Es diferencia entre energia potencial i energia cinètica, que juntes conformen l'energia mecànica.

2.2.1 Energia potencial

L'energia potencial d'un cos és aquella que posseeix degut a l'altura a la qual està situat.

Es representa per la següent expressió:

$$Ep = m * g * h$$

on, m és la massa del cos [m]

g és la gravetat del sistema on romangui el cos, en el cas de la terra 9,81 [m/s²]

h és l'altura on està suspès el cos [m]

2.2.2 Energia cinètica

L'energia cinètica d'un cos és aquella que posseeix pel fet de tenir un moviment, velocitat.

Es representa per la següent expressió:

$$Ec = \frac{1}{2} * m * v^2$$

on, m és la massa del cos [m]

v és velocitat del cos [m/s]

2.2.3 Energia mecànica

L'energia mecànica d'un cos és la suma de les seves energies, cinètica i potencial.

Es representa per la següent expressió:

$$Em = Ec + Ep$$

$$Em = \frac{1}{2} * m * v^2 + m * g * h$$

on, m és la massa del cos [m]

g és la gravetat del sistema on romangui el cos, en el cas de la terra 9,81 [m/s²]

h és l'altura on està suspès el cos [m]

v és velocitat del cos [m/s]

2.2.4 Conservació de l'energia

Segons el principi de la conservació de l'energia, la quantitat d'energia d'un procés en un sistema tancat es conserva.

L'energia ni es crea, ni es destrueix, només es transforma.

En un sistema on només actuen forces conservatives es té que:

$$Et = Ec + Ep + \dots = \text{valor constant}$$

on, Et és l'energia total [J]

Ec és l'energia cinètica [J]

Ep és l'energia potencial [J]

Ara bé, aquesta fórmula no sempre es compleix, ja que sovint es tenen forces no conservatives, com poden ser els fregaments.

Per tant, el treball de les forces no conservatives és igual a la variació d'energia del cos:

$$W_{fnc} = \Delta E$$

on, W_{fnc} és el treball de les forces no conservatives [J]

ΔE és la variació en el total d'energia [J]

2.2.5 Fregament

El fregament és la resistència o impediment de moviment d'un cos o superfície sobre un altre.

La fórmula de Coulomb expressa aquesta força de fregament de la següent manera:

$$F_f = \mu * N$$

on, μ és el coeficient de fricció [-]

N és la força normal [N]

2.2.6 Fricció de fluids















La fricció o arrossegament de l'aire, és una fricció de fluids, on intervenen un objecte sòlid i el fluid, líquid o gas, per on el sòlid es desplaça.

Aquest fluid fa una força que s'oposa al moviment de l'objecte i el fa desaccelerar.

S'utilitza la següent fórmula:

$$F = -\frac{1}{2} * \text{Coeficient numèric d'arrossegament} * \text{densitat de l'aire} * \text{àrea} * v^2$$

on, C Coeficient numèric d'arrossegament segueix una taula [-]

FORMA	COEFICIENT D'ARROSSEGAMENT
Esfera → 	 0.47
Semiesfera → 	 0.42
Con → 	 0.50
Cub → 	 1.05
Cub inclinat → 	 0.80
Cilindre llarg → 	 0.82
Cilindre curt → 	 1.15

Fotografia 49: Coeficient d'arrossegament
 Font: https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre/
 Posteditat amb Paint 3D

ρ densitat de l'aire, depèn de la temperatura [kg/m³]

A àrea que està en contacte amb el fluid, directament [m²]

v és la velocitat [m/s]

2.3 Acceleracions

2.3.1 Acceleració tangencial

Component del vector acceleració, la direcció i el sentit de la qual són tangents a la trajectòria en la posició del punt en el que es calcula. Ve donada per la derivada del mòdul del vector velocitat respecte del temps:

$$A_t = \frac{dv}{dt}$$

on, A_t és l'acceleració tangencial [m/s²]

$\frac{dv}{dt}$ és la derivada de la velocitat, respecte del temps [$\frac{m}{s} = \frac{m}{s}$]

2.3.2 Acceleració normal o centrípeta

Component del vector acceleració que té com a direcció la de la normal a la trajectòria en la posició del punt en moviment:

$$A_n = \frac{v^2}{r}$$

on, A_n és l'acceleració normal [m/s²]

v és la velocitat del cos [$\frac{m}{s}$]

r és el radi de curvatura [r]

2.4 Geometria

2.4.1 Teorema de Pitàgores

El teorema de Pitàgores relaciona la mida dels catets, costats que formen l'angle recte, d'un triangle rectangle amb la de la hipotenusa.

Ho fa mitjançant la següent expressió:

$$h^2 = c_1^2 + c_2^2$$

on, h és la hipotenusa [m]

c_1 i c_2 són els catets del triangle (costats) [m]

2.4.2 Raons trigonomètriques

En matemàtiques, les funcions trigonomètriques són funcions d'un angle. Són la base per l'estudi de la trigonometria, els triangles i per la modelització dels fenòmens periòdics, entre moltes altres aplicacions.

Les funcions trigonomètriques es defineixen habitualment com a quocients entre les longituds de dos costats d'un triangle rectangle que contingui l'angle, i de forma equivalent es poden definir a partir de les longituds de diversos segments de la circumferència goniomètrica (circumferència de radi unitat, el centre de la qual és l'origen d'un sistema de coordenades cartesianes).

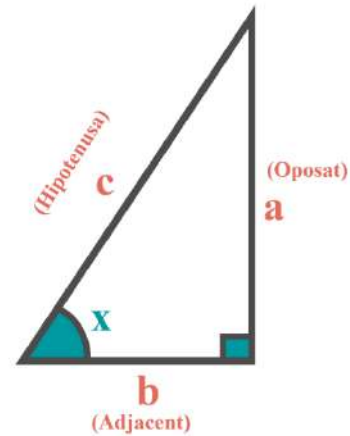
Hi ha definicions més modernes que les expressen com a sèries infinites o com a solucions d'equacions diferencials, l'avantatge d'aquestes definicions és que permeten estendre les funcions trigonomètriques a cossos arbitraris com per exemple els nombres complexos.

Prenent aquest triangle com a referència:

$$\sin(x) = \frac{a}{c}$$

$$\cos(x) = \frac{b}{c}$$

$$\tan(x) = \frac{\sin(x)}{\cos(x)} = \frac{\frac{a}{c}}{\frac{b}{c}} = \frac{a * c}{b * c} = \frac{a}{b}$$



Fotografia 50: Triangle raons trigonomètriques
Font: <https://www.sangakoo.com/ca/temes/raons-trigonometriques-sinus-cosinus-i-tangent>

2.5 Normativa

La normativa que regula el disseny i funcionament de les muntanyes russes està redactada, principalment, per dues associacions, l'ASTM i la IAAPA.

2.5.1 IAAPA

La International Association of Amusement Parks and Attractions, IAAPA, associació fundada el 1918, és l'associació comercial internacional més gran d'instal·lacions i atraccions d'atraccions permanents i es dedica a la preservació i la prosperitat de la indústria de les atraccions.

L'associació representa prop de 5.000 instal·lacions, proveïdors i membres individuals a 99 països. Les instal·lacions dels membres inclouen parcs d'atraccions i temàtics, parcs aquàtics, atraccions, centres d'entreteniment familiar, zoològics, aquaris, museus, centres científics i centres turístics.



Fotografia 51: IAAPA
Font: <https://www.iaapa.org/es/expos/expo-iaapa>

Cada any celebren una Exposició en la qual s'informa de l'actualitat. L'any 2021 Barcelona en va ser l'amfitriona!

2.5.2 ASTM

L'American Society for Testing Materials, ASTM International, és l'organització internacional que desenvolupa i publica estàndards tècnics de consens voluntari per a una àmplia gamma de materials, productes, sistemes i serveis.

Està formada per voluntaris de molts països.

L'organització compta amb diferents subdivisions, dins de la qual existeix el que regula les muntanyes russes, què és l'ASTM F24, comitè sobre parcs i aparells de diversió.

Aquest comitè va ser creat el 1978 i compta amb el suport de 23 països amb més de 800 membres.

ASTM divideix les seves normes en Volums. La Indústria de l'entreteniment està al volum 15, que conté més de 12.000 normes. D'aquestes, només 19 estan sota el llegat del comitè F24, i per tant, vinculades als aparells de diversió i entre elles les muntanyes russes.



Fotografia 52: ASTM F24

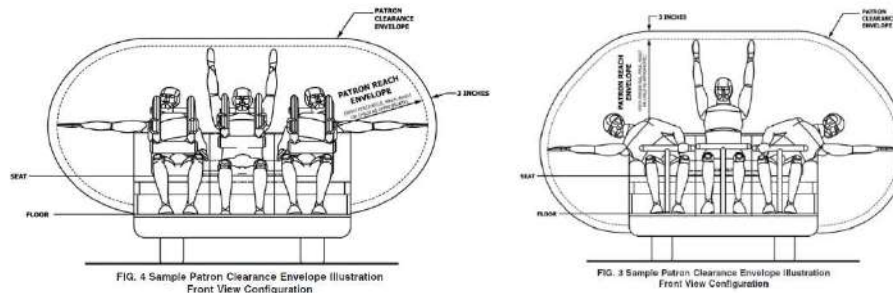
Font:

<https://www.youtube.com/watch?v=f8Mm4E5rjDc&t=113s>

2.5.3 Normes bàsiques

Entre l'ASTM i la IAAPA redacten diferents normatives a seguir. Si s'haguessin de destacar i analitzar totes i cada una de les normes que existeixen no s'acabaria mai. Per tant, en aquest capítol, s'esmenten les més habituals.

- S'ha de tenir en compte que el passatger pot moure's dins del vagó i s'ha de procurar que aquest no afecti cap element. Per aquest motiu, caldrà traçar una el·lipse amb la mobilitat màxima de la persona comprovar si hi ha elements sensibles en el seu interior.



Fotografia 53: Mobilitat del passatger

Font: F2291 – 21 → 6.6.4.2

- Tota muntanya russa necessita tenir sistemes redundants de prevenció, és per això que s'hauran de col·locar 2 sistemes de tot: frens, antiretorns, seguretat per evitar que la barra dels seients s'aixequin,...

- Les tanques prèvies a entrar a l'atracció han de seguir unes mides i condicions determinades. Han de resistir tal que el passatger no pugui obrir-la fent força i han de tenir una alçada mínima.

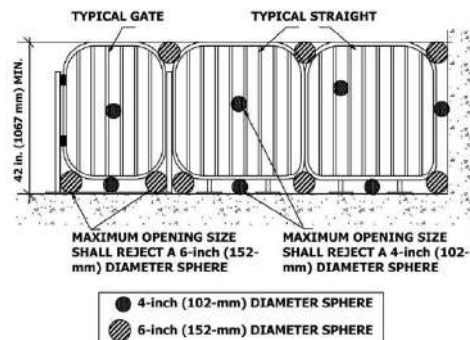
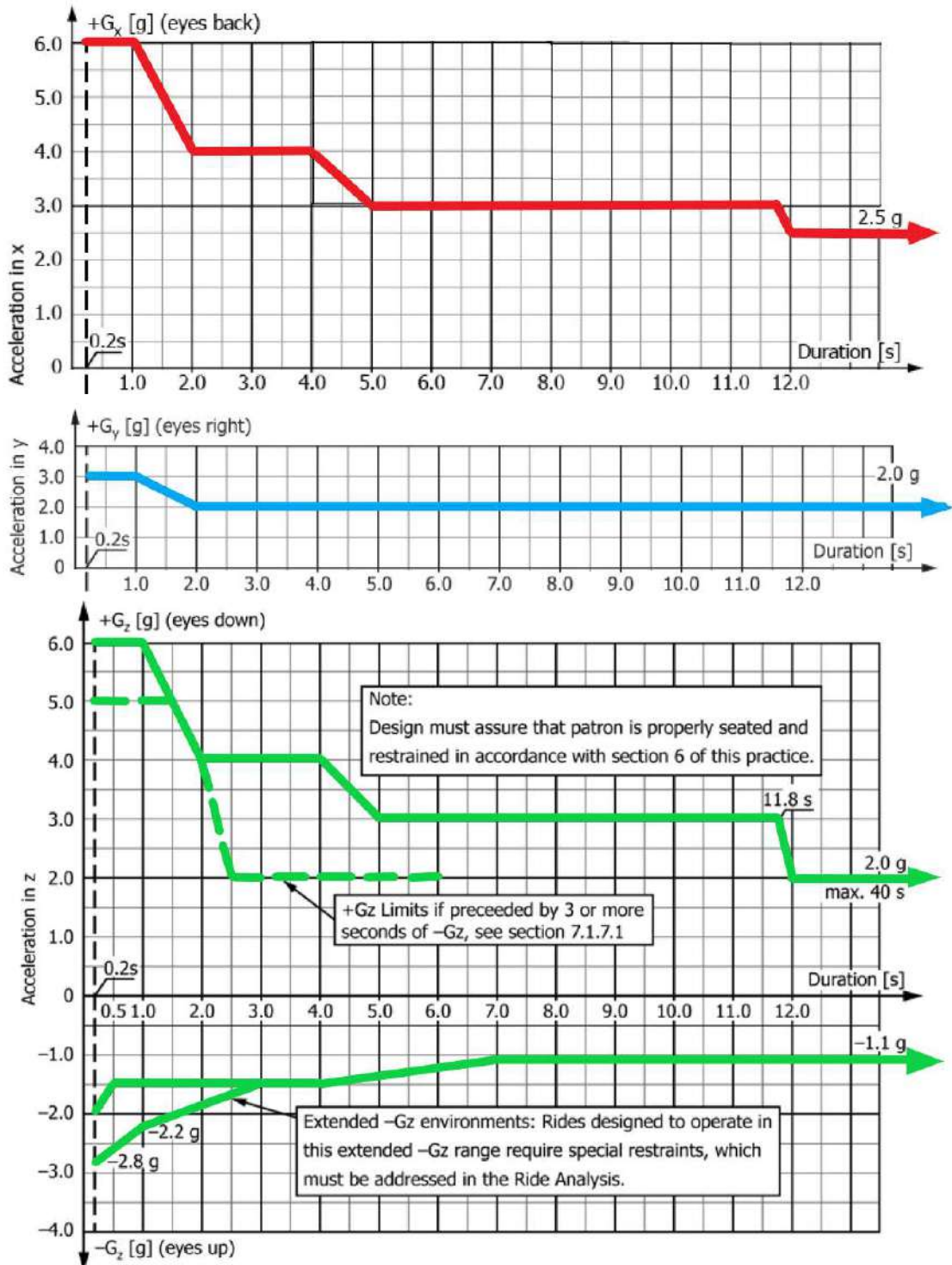


FIG. 23 Fence, Guardrail, and Gate Configuration with Radiused Corners.

Fotografia 54: Tanques d'entrada a l'atracció

Font: F2291 – 21 → 14.2.2.5

- o Màximes forces G a les que pot estar sotmès el passatger durant el transcurs del recorregut i la seva durada màxima.



Fotografia 55: Forces G màximes segons l'eix de coordenades (x, y i z)
Font: F2291 – 21 → 7.1.4

2.6 Programari

A continuació s'esmenten els programes d'ordinador usats al llarg del treball. S'expliquen, en ordre d'ús i de forma breu, com funcionen i perquè s'han necessitat en el procés.

2.6.1 Discord

Xarxa social on pots unir-te a tota mena de comunitats. Als inicis del projecte es va trobar un grup de persones amants de les muntanyes russes (Coaster Printing Central) amb les que es pot compartir i aprendre d'ells i de les seves experiències.

Tot i no ser un programa com a tal ha estat de gran ajuda alhora de l'obtenció d'informació o contrast de resultats.



Fotografia 56: Discord logotip

Font: <https://www.anmosugoi.com/videojuegos/noticias-juegos/microsoft-busca-comprar-discord-por-mas-de-10-mil millones-de-dolares/>

2.6.2 NoLimits2 (NL2)

NoLimits2 és un joc de simulació de muntanyes russes que permet experimentar autèntiques emocions, centrant-se en el realisme i la velocitat. NoLimits2 permet muntar muntanyes reals existents o construir muntanyes russes segons les especificacions de l'usuari.



Fotografia 57: NoLimits2 logotip

Font: <https://vandal.elespanol.com/juegos/pc/nolimits-2-roller-coaster-simulation/25764#p-13>

El programa inclou un munt de variables, des del disseny del vagó fins al recorregut de la via.

Permet triar l'estil de muntanya, es pot simular-la i gaudir-la i fins i tot veure com seria l'atracció dissenyada en la vida real; pots provar formes esbojarrades, veure com pateix el passatger durant el viatge,...

NL2 va permetre dissenyar la muntanya russa que es volia, simulant-la i provant moltes vegades, fins que el recorregut va semblar apte i prou divertit.

Un cop dissenyada, s'exporten els punts (coordenades x, y i z), que corresponen a la trajectòria.



Fotografia 58: Disseny propi NL2
Font: Pròpia – Document NL2

2.6.3 Excel

Programa de Microsoft de full de càlcul que permet fer, a banda de càlculs de forma repetitiva i ràpida, generar gràfics, inserir fórmules,...

Ha estat un dels programes més emprats, degut al seu ús matemàtic per fer càlculs i la seva fàcil utilització.

Ha permès afegir tot de variables al treball i calcular què passaria si algun paràmetre canviés.

L'Excel també s'ha utilitzat per redimensionar les mides de la muntanya russa, passant de l'escala real a una escala en miniatura per a la realització de la maqueta.



Fotografia 59: Excel logotip
Font: https://www.abc.es/tecnologia/consultorio/abci-trucos-excel-para-ahorrar-decenas-horas-202002260208_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Ftecnologia%2Fconsultorio%2Fabci-trucos-excel-para-ahorrar-decenas-horas-202002260208_noticia.html

2.6.4 Python

Llenguatge de programació d'alt nivell d'ús general, utilitzat per realitzar càlculs més complexes, com ara les acceleracions, que es va provar de fer en Excel i en tractar-se de sistemes en tres dimensions resultava excessivament complicat.

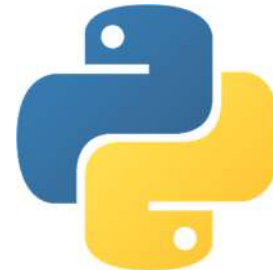
Per tal d'elaborar el codi per Python s'ha utilitzat el programador PyCharm i tot de llibreries complementàries.

D'aquest llenguatge cal saber algunes funcions importants:

- print(x) → mostra els valors d'x.
- import x as → referència que s'usa per importar una llibreria i referenciar-la, de tal manera que sempre que escriguis el seu nom d'importació, el que està després d'as, estaràs cridant a la funció.



Fotografia 61: PyCharm logotip
Font: <https://www.cleanpng.com/png-pycharm-integrated-development-environment-jetbrai-1882915/>



Fotografia 60: Python logotip
Font: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_Python

2.6.5 SolidWorks

Programa informàtic d'enginyeria assistida per ordinador i de modelatge sòlid.

A SolidWorks és on va succeir la màgia.

Aquest CAD va permetre dissenyar les peces de la muntanya dissenyada prèviament a NL2 a partir dels punts reescalats en EXCEL i dividits per peces una a una.

No ha estat un procés fàcil, ja que aquest programa l'utilitzen professionals i és molt tècnic.



Fotografia 62: SolidWorks logotip
Font: <https://quizizz.com/admin/quiz/60aef5cb8242b8001ccac4f4/interfaz-de-solidworks>

2.6.6 Cura

Software gratuït que permet preparar les impressions per la impressora 3D.

Cal determinar la duresa del material, el gruix de les capes, la temperatura,...

S'importen els dissenys des de SolidWorks i s'apliquen els paràmetres d'impressió.



Fotografia 63: Cura logotip

Font:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Cura_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cura_(software))

2.6.7 Word

Processadors de textos de Microsoft emprat per a la redacció i edició de tot aquest treball.

Ha permès, afegir i indexar tots els elements com peus de fotos, títols i els seus apartats, numeració a partir d'una pàgina determinada,...



Fotografia 64: Word logotip

Font: <https://www.cediformacio.com/producto/microsoft-word/>

2.6.8 Premiere Pro

Aplicació destinada a l'edició de vídeo en temps real de la companyia Adobe. S'ha utilitzat per fer tota mena de vídeos editats amb música i algun efecte especial.

Té moltes funcionalitats i tota mena d'aplicacions.

Utilitzat per gravar i editar clips de vídeo de la muntanya russa, que a posteriori han estat penjats a la plataforma YouTube.



Fotografia 65: Premiere Pro CC logotip

Font: <https://www.flstudiocrack.org/adobe-premiere-pro-cc-crack-download-full-version/>

<https://www.youtube.com/channel/UC7V1pGwABrcXHNq3GFqO2Tw>

3. DISSENY DE LA MUNTANYA RUSSA

3.1 Metodologia

Per dissenyar el recorregut i els elements de la muntanya russa s'ha intentat buscar una forma atractiva i que proporcioni bones emocions i experiències als passatgers.

En primer lloc, s'ha realitzat un estudi de diverses atraccions i se n'ha extret els components més emocionants dels que s'ha generat una barreja a través de la pròpia imaginació per a dissenyar.

Aquest disseny s'ha simulat en el programa NL2, a través del qual s'ha comprovat el seu funcionament i s'han pogut veure les seves sensacions.

La trajectòria obtinguda amb el NL2 s'ha exportat en forma de coordenades cartesianes (x, y i z) per a utilitzar-les en dues finalitats:

- Comprovació dels càlculs i l'aplicació de la formulació apresada durant els cursos de batxillerat, emprant EXCEL i Phyton.
- Disseny de les peces que componen la maqueta en Solidworks.

Finalment, s'ha construït una maqueta a partir del disseny.

3.2 Fonts d'inspiració

3.2.1 Shambala, a PortAventura, Catalunya

Aquesta muntanya ha estat la principal base d'inspiració.

L'ús d'una pujada molt elevada per veure tot el que t'envolta i després un recorregut amb poques acrobàcies suposa un recorregut simple i senzill.

Nota de l'autor: A més a més, he tingut la sort d'haver pujat en aquesta muntanya i d'experimentar les emocions d'aquesta atracció. Com que les trobo fascinants, volia replicar-les, tot i que amb alguna variació en el recorregut, per no ser una còpia exacta.



Fotografia 66: Shambala

Font: <https://www.flickr.com/photos/achlysf/37480997840>

3.2.2 Steel Force i Nitro, Estats Units, i Goliath, Països baixos

Aquestes tres muntanyes han servit com a base de disseny dels turonets (*Bunny Hop*).

Aquesta figura provoca un alçament ràpid del seient i un retorn immediat.

En tots els casos, aquestes muntanyes encadenen 2 o 3 *turonets* seguits, idea que s'ha decidit aplicar en el disseny de la muntanya.



Fotografia 69: Goliath
Font: [https://coasterpedia.net/wiki/Goliath_\(Walibi_Holland\)](https://coasterpedia.net/wiki/Goliath_(Walibi_Holland))



Fotografia 68: Nitro
Font: https://www.tripadvisor.com/LocationPhotoDirectLink-q46528-d104356-i239583149-Six_Flags_Great_Adventure-Jackson_New_Jersey.html



Fotografia 67: Steel Force
Font: <https://www.undercvertourist.com/philadelphia/dorney-park/steel-force/>

3.2.3 The Smiler, a Alton Towers, Regne Unit

Els colors i l'estil d'aquesta muntanya han agradat en la tria de la coloració.

Després d'haver vist tota mena de combinacions, la del groc i negre ha semblat encertada, a banda que la barreja entre ells crida molt l'atenció degut a la seva opositat. El groc és un color molt visible i clar, mentre que el negre és fosc i passa desapercebut, sobretot a la nit.

Aquesta atenció provoca que es relacionin amb el perill. Es poden assimilar al cas d'alguns animals: insectes, rèptils, amfibis, ..., que avisen de la seva perillositat a través d'aquests colors.



Fotografia 70: The Smiler
Font: <https://www.altontowers.com/explore/theme-park/rides-attractions/the-smiler/>



Fotografia 73: Serp
Font: <https://www.provechososite.com/so-nar-con-serpientes-cual-es-el-significado/>



Fotografia 72: Granota
Font: <https://he.m.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:Dendrobates-leucomelas-gelbgeb%C3%A4nderter->



Fotografia 71: Abella
Font: https://es.wikipedia.org/wiki/Apis_melifera

Aquesta associació que es fa entre els colors de la pell dels animals i la perillositat, també la fan els humans en cartells i senyals.



Fotografia 74: Cartells de perill vari
Font: <https://preventionshop.es/ca/28-advertencia-perill>

3.3 El nom

Tota muntanya russa és coneguda pel seu nom. En molts casos es busca un nom atractiu i interessant que atregui molts passatgers. També sol tenir certa relació amb l'espai que l'envolta, és a dir, l'ambient d'aquell parc temàtic en aquella zona.

En aquest cas, es va haver d'escollir un nom sota uns criteris preestablerts per l'autor:

- ha de ser en català:
per tal de defensar l'autoctonisme de la muntanya, s'ha decidit emprar la llengua d'ús habitual en la zona.
- no pot contenir simbologies estrambòtiques:
el fet de decidir un nom estrany podria provocar dubtes als passatgers mentre que es necessita un nom clar.
- que el nom imposi:
serà necessari que el nom faci cert respecte, ja que la gent s'adoni de la magnitud de la muntanya a la qual pujarà, és a dir, no és una qualsevol.
- curt i fàcil de pronunciar:
serà necessari pels estrangers poder pronunciar de forma adequada la paraula per tal de fer-hi referència.
- relació amb la muntanya:
que tingui una mínima referència cap a la temàtica escollida.

Després d'analitzar tots aquests paràmetres, es va decidir anomenar la muntanya: EL RUSC.

El fet que pren més pes són els seus colors, el groc i el negre, similars al color d'una abella. També hi ha un paral·lelisme entre les abelles i la muntanya, i és que ambdues donen voltes i segueixen un recorregut en l'aire aleatori.

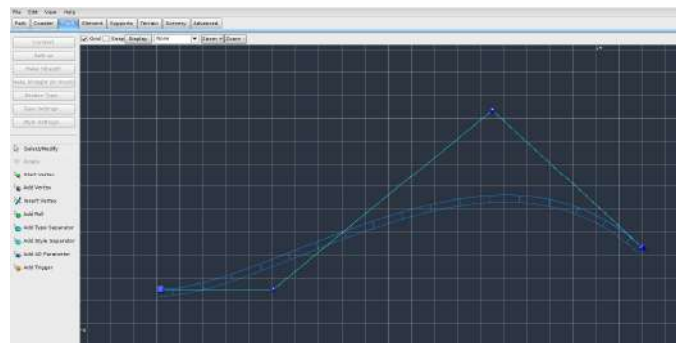
Però el mot abelles era llarg i potser difícil de pronunciar pels estrangers, degut a la doble l. Per solucionar-ho es va decidir EL RUSC, que és on viuen les abelles.

3.4 Recorregut

A partir de les fonts d'inspiració es dissenya el recorregut de la muntanya russa a través del simulador NoLimits2.

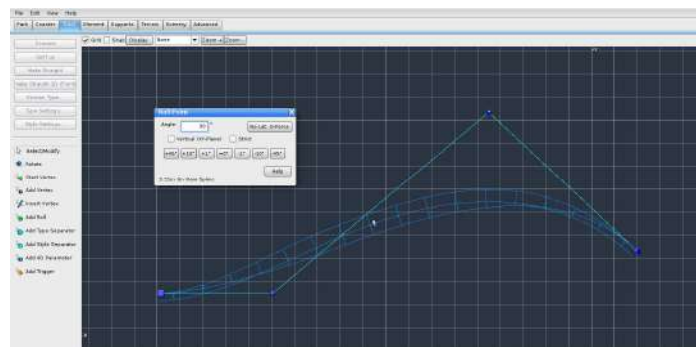
La simulació permet veure com seria la muntanya dissenyada en la realitat, en cas de ser construïda. Es van decidir tots els canvis de direcció, peralts en les vies, alçades totals, indirectament la velocitat; bigues de suport, colors, estil d'esquelet de la via, etc.

NoLimits2 és un software emprat per la indústria de les muntanyes russes. Per tal de dissenyar el teu propi recorregut, tan sols cal traçar punts per on el propi programa traça una línia contínua. Es poden definir les alçades i distàncies.



Fotografia 75: Inserció de punts en NL2 per inici de disseny
Font: Pròpia

El programa també permet peraltar el recorregut, crear els suports i escollir quin estil de tren i vagó es vol emprar.



Fotografia 76: Inserció de peralt en NL2 per inici de disseny
Font: Pròpia

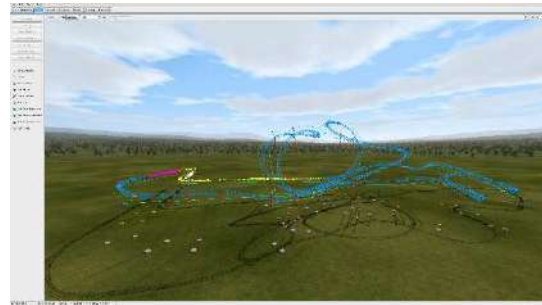
Cal destacar, que es van elaborar diferents proves abans de dissenyar la meua pròpia muntanya. Aquestes, eren molt més complexes i permetien aprendre com funciona el software.

Un gran avantatge del programa és que un cop la muntanya ha estat dissenyada, es pot generar una vista en 3D que et permet simular l'atracció i veure com quedaria el disseny.

A més a més, es pot afegir un paisatge, a través de la col·locació d'objectes al voltant de la muntanya. Això li proporciona al disseny un toc més artístic i únic.



Fotografia 78: Dissenys experimentals
Font: Pròpia



Fotografia 77: Dissenys experimentals
Font: Pròpia



Fotografia 79: Simulació disseny experimental
Font: Pròpia

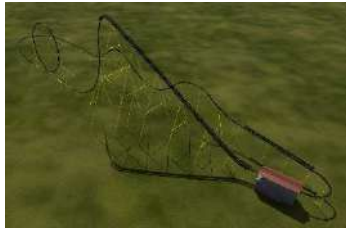
De l'experiència obtinguda amb aquests dissenys preliminars, ha permès general la meua pròpia muntanya russa.

Aquesta muntanya té un recorregut senzill que inclou alguns dels elements més típics: *Looping*, corba peraltada, turonets i una baixada des de molta alçada.

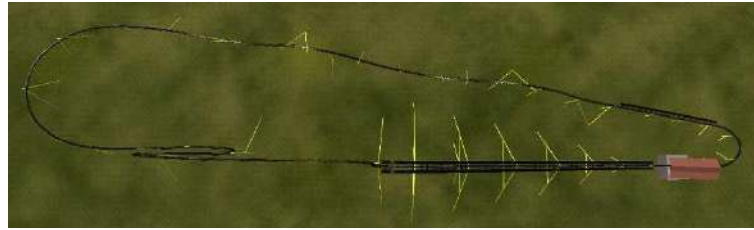
A continuació es mostra el recorregut del disseny realitzat:



Fotografia 80: Simulació del meu propi disseny vist en perfil
Font: Pròpia



Fotografia 82: Simulació del meu propi disseny vist en 3D
Font: Pròpia



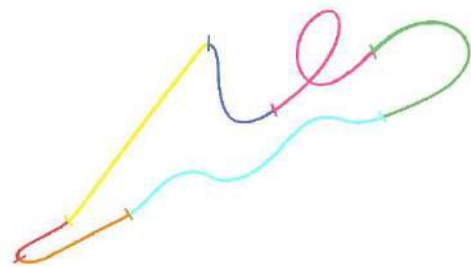
Fotografia 81: Simulació del meu propi disseny vist en planta
Font: Pròpia

El recorregut de la muntanya es divideix en diversos trams segons la seva funcionalitat. En les fotos que apareixen a continuació es mostra la divisió de la muntanya en diversos segments per a la seva explicació, alhora que es grafia en diferents colors:

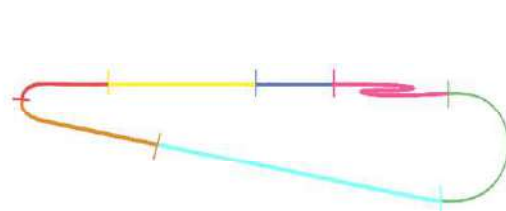
- Estació.
- Pujada.
- Baixada.
- Looping.
- Corba.
- Turonets.
- Zona de frenada.



Fotografia 83: Recorregut desplegat
Font: Pròpia



Fotografia 85: Recorregut vista en 3D
Font: Pròpia



Fotografia 84: Recorregut vist en planta
Font: Pròpia

3.4.1 Estació

L'estació és el lloc on els passatgers i les passatgeres pujaran i baixaran.

Serà una zona amb molt de xivarri. Gent pujant als trens, gent baixant-ne, arnesos amunt, arnesos avall,... També hi haurà un lloc des d'on tot estarà controlat i es donarà l'ordre de sortida als diferents trens, plens de gent.

3.4.2 Pujada

A continuació vindrà el moment més plàcid del viatge. En ell, els passatgers gaudiran de les vistes del parc, podran observar tot el que els envolta i xerraran amb el del costat, tot a l'espera de l'arribada de l'adrenalina de la baixada.

Estaran nerviosos, ja que els depara una baixada trepidant, però no tindran altra alternativa.

3.4.3 Baixada

A la baixada tots cridaran, ja que caure des de 80 metres d'alçada fa certa por. Els més atrevits aixecaran els braços i cridaran d'alegria i els més porucs cridaran de por.

Després d'assolir una alta velocitat al final de la baixada, hi haurà uns segons de calma abans del pròxim element.

3.4.4 Looping

Seguidament vindrà l'única inversió de tot el recorregut, la del Looping.

Els passatgers sentiran aquell temor de caure durant uns segons, però en un tancar i obrir d'ulls, ja hauran sortit de l'element.

3.4.5 Corba

La corba peraltada serà necessària per poder tornar a l'estació.

Serà un moment on els passatgers pensaran que tocaran el terra, ja que pràcticament el peralt arriba als 90 graus.

3.4.6 Turonets

A l'inici dels turonets, després de la llarga corba, els passatgers tindran uns instants per respirar tranquil·lament i encarar la recta final del trajecte.

Aquest element, amb dues elevacions, farà que els passatgers s'aixequin dels seus seients i ràpidament siguin empesos contra el propi un altre cop.

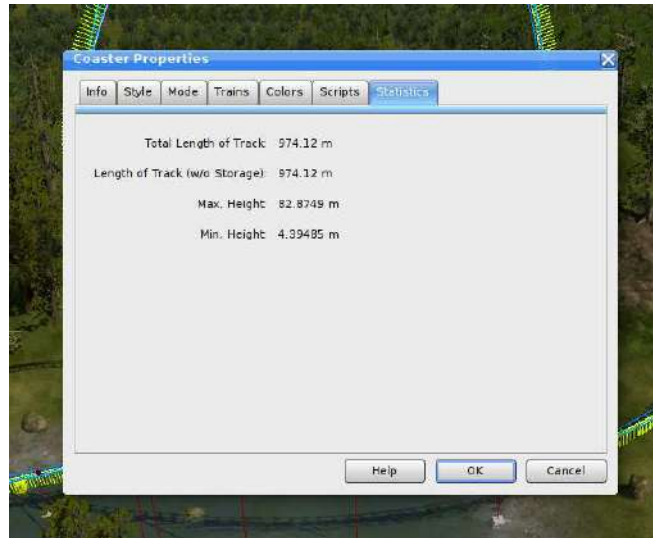
3.4.7 Zona de frenada

Després s'arriba a l'espai de frenada, on uns frens accionats per uns sensors, reduiran la velocitat del vagó.

Deixaran una mica de velocitat perquè el vagó pugui arribar a l'estació sense cap altre impuls.

3.4.8 Característiques del recorregut

A partir del disseny s'han pogut extreure unes primeres dades:



Fotografia 86: Propietats del recorregut
Font: NL2

3.5 Càlculs

En aquest apartat s'explicaran com s'han realitzat tots els càlculs, quines operacions i fórmules, i el perquè s'han utilitzat en el disseny de la muntanya russa.

Si es volen veure totes les taules senceres amb càlculs, aquests s'adjunten en un document annex, mentre que en aquest capítol es mostren alguns resultats a mode d'exemple.

També cal destacar que els números estan tots elaborats en notació americana, punts en lloc de les comes, ja que NL2 exporta els punts d'aquesta manera.

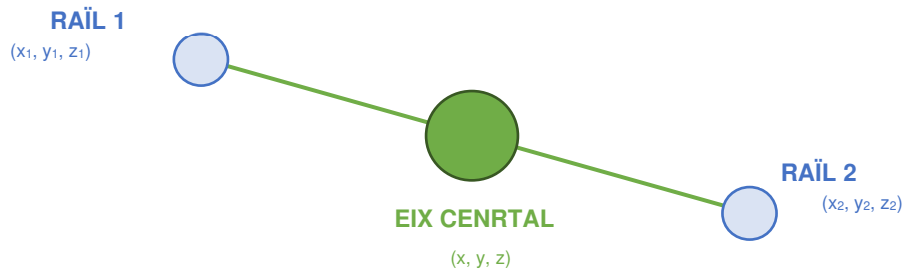
Els càlculs inicials estan realitzats en Excel i els finals en Phyton.

Partint del disseny a NL2, s'exporten els punts de la trajectòria en coordenades cartesianes (x, y i z), a partir dels quals s'han realitzat tots els càlculs.

POS X [m]	POS Y [m]	POS Z [m]
-5.641646	12.070048	17.500702
-6.070964	12.01524	17.250382
-6.491612	11.96048	16.985745
-6.902839	11.905783	16.706684
-7.303789	11.851169	16.413035
-7.69348	11.796659	16.104588

Taula 2: Alguns dels punts exportats de NL2

Hi ha 1944 coordenades, cadascuna amb les seves components x, y i z, per l'eix central del recorregut, i el mateix nombre per cadascun dels dos raïls, de manera que permet determinar el peralt en cada punt de la trajectòria. Per tant, cada coordenada està definida per tres punts que determinen un pla.



3.5.1 Velocitat

A continuació s'explicaran tots els càlculs realitzats per determinar la velocitat en cada punt de la trajectòria:

- Força normal.
- Forces de fricció.
- Velocitat.

Aquests càlculs s'han realitzat amb el programa Excel.

3.5.1.1 Normal

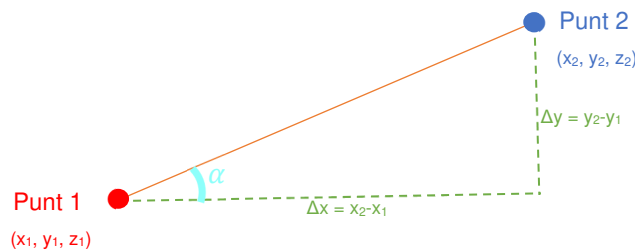
Degut al seu ús en altres fórmules, el primer que s'ha calculat ha estat la força normal en cada un dels punts de la trajectòria.

S'ha utilitzat la fórmula:

$$N = m * g(9,81) * \cos(\alpha).$$

En aquesta fórmula es tenen dues incògnites: la massa i α .

Per trobar α , la inclinació de la recta que uneix dos punts (1 i 2), s'han aplicat conceptes de trigonometria. S'ha traçat un triangle entre els dos punts, a partir de la qual s'ha aplicat la tangent de l'angle:



$$\tan(\alpha) = \frac{\sin}{\cos} = \frac{Ay}{Ax}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin}{\cos}\right) = rctan\left(\frac{Ay}{Ax}\right)$$

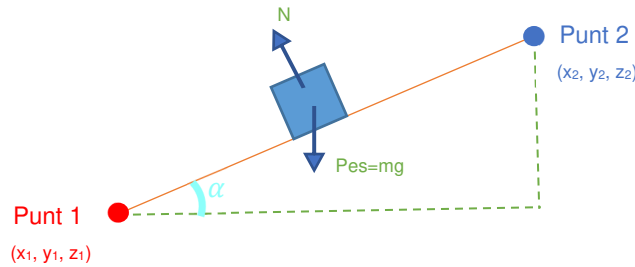
Com a massa, s'han suposat tres casos diferents: amb el vagó buit, amb el vagó ple de persones de pes estàndard (70 kg) i amb el vagó ple de persones amb sobrepès (120 kg).

CAS	PES DEL VAGÓ [kg]	PERSONES	PES PERSONES [kg]	TOTAL [kg]
1	2.500	0	0	2500
2	2.500	16	1.120	3.620
3	2.500	16	1.920	4.420

Taula 3: Taula dels pesos

Un cop s'ha determinat l'angle i la massa, ja es pot calcular la normal.

Se sap que el pes és perpendicular a la superfície terrestre i que la normal és perpendicular al terra d'on està l'objecte.



$$Normal = mg * \cos(\alpha) = [N]$$

PosX [m]	PosY [m]	PosZ [m]	ANGLE [°]	N1 [N]	N2 [N]	N3 [N]
-5.641646	12.070048	17.500702	7.275194949	24327.55805	35226.30405	43011.12263
-6.070964	12.01524	17.250382	7.417059546	24319.79369	35215.06126	42997.39524
-6.491612	11.96048	16.985745	7.576399035	24310.89514	35202.17617	42981.66261
-6.902839	11.905783	16.706684	7.756608073	24300.60454	35187.27538	42963.46883
-7.303789	11.851169	16.413035	7.962870264	24288.53118	35169.79314	42942.12312
-7.69348	11.796659	16.104588	8.201563528	24274.1666	35148.99323	42916.72655

Taula 4: Taula de les forces Normals pel pes 1

3.5.1.2 Friccions i velocitats

A continuació es calculen les velocitats en cada instant del recorregut.

Cal comentar que s'ha calculat a través d'interval, és a dir, la velocitat durant un període del recorregut suposant velocitat constant en aquest interval, ja que aquests són molt petits.

També cal destacar que durant l'instant de pujada s'ha suposat una velocitat constant feta per la cadena que arrossega el tren a la part superior de 8km/h=2.22222m/s.

El que succeeix és que la fricció, determinada pel fregament amb l'aire (F_{faire}) i el fregament amb els rails (F_{fterra}), influeix en la velocitat, per tant, estan relacionats.

Primer cal recordar les diferents fórmules a utilitzar:

$$F_{\text{aire}} = -\frac{1}{2} * \text{Coeficient num. d'arrossegament} * \text{dens. de l'aire} * \text{àrea} * v^2$$

$$F_{\text{terra}} = \mu * N$$

$$W_{nc} = \Delta E_p$$

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2$$

$$E_p = m * g * h$$

Abans, però serà molt útil calcular la distància que avança en cada instant, distància entre punts de l'interval.

Per fer-ho s'utilitzarà el Teorema de Pitàgores:

$$h^2 = c_1^2 + c_2^2 + c_3^2$$

$$h = \sqrt{c_1^2 + c_2^2 + c_3^2}$$

que adaptat a les dades, i emprant les raons trigonomètriques, quedaria de la següent manera, tenint en compte que traça una línia recta:

$$\text{dist}^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

$$\text{dist}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

$$\text{dist} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

PosX [m]	PosY [m]	PosZ [m]	DISTÀNCIA RECORREGUDA [m]
-5.641646	12.070048	17.500702	0.047108903
-6.070964	12.01524	17.250382	0.499977964
-6.491612	11.96048	16.985745	0.499976139
-6.902839	11.905783	16.706684	0.499974448
-7.303789	11.851169	16.413035	0.499973326
-7.69348	11.796659	16.104588	0.499969966

Taula 5: Distàncies entre punts

Es pot observar que la majoria de les distàncies entre punts s'aproximen molt a 0.5m, excepte el primer interval. Es pot afirmar que són punts equidistants i es confirma que són distàncies molt petites, i per tant, la suposició que en cada interval la variable calculada és constant, suposa un error relativament petit.

Un cop es té això clar toca eliminar incògnites, valors que s'estan buscant (fregaments i velocitats).

Tenint en compte que s'utilitzarà el treball, s'aplica la fórmula:

$$W (\text{treball}) = F(\text{força}) * d(\text{distància})$$

Primer es comença per la força de fregament amb l'aire:

$$F_{\text{aire}} = -\frac{1}{2} * \text{Coeficient num. d'arrossegament} * \text{dens. de l'aire} * \text{àrea} * v^2$$

$$F_{\text{aire}} = -\frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * v^2$$

on, el coeficient numèric d'arrossegament s'ha decidit per a un cilindre curt, ja que era el que més s'assemblava a un vagó amb gent.

la densitat de l'aire que es determina a partir de la temperatura mitjana a Catalunya al llarg d'un any.

l'àrea que ocupen aproximadament dos seients.

A continuació es trobarà el treball:

$$W (\text{treball}) = F(\text{força}) * d(\text{distància})$$

$$W_{\text{ffaire}} = F_{\text{aire}} * \text{dist. recorreguda entre punts}$$

$$W_{\text{ffaire}} = -\frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * v^2 * \text{dist. recorreguda entre punts}$$

Sabent que es té el valor de distància recorreguda, ara el treball només depèn de la velocitat.

Se seguirà amb l'altre fregament, el del terra amb els raïls

$$F_{\text{fterra}} = \mu * N$$

Com es pot observar, aquesta força depèn d'una constant, μ , que serà la que hi hagi entre els raïls i les rodes.

El material de les rodes és el una barreja entre poliuretà i niló i els raïls el ferro.

El coeficient de fregament entre ambdós és:

$$\mu = 0.003$$

Per tant:

$$F_{\text{fterra}} = 0.003 * N$$

Sabent que la normal és una variable ja calculada prèviament, només faltaria trobar el treball:

$$W (\text{treball}) = F(\text{força}) * d(\text{distància})$$

$$W_{\text{ffrt}} = F_{\text{fterra}} * \text{dist. recorreguda entre punts}$$

PosX	PosY	PosZ	FREGAMENT RAÏLS	
			FORÇA	TREBALL
[m]	[m]	[m]	[N]	[J]
-5.641646	12.070048	17.500702	72.98267414	3.438133682
-6.070964	12.01524	17.250382	72.95938106	36.47808279
-6.491612	11.96048	16.985745	72.93268543	36.46460245
-6.902839	11.905783	16.706684	72.90181362	36.44904405
-7.303789	11.851169	16.413035	72.86559353	36.43085315
-7.69348	11.796659	16.104588	72.8224998	36.40906278

Taula 6: Forces de fregament del raïl amb les rodes pel pes 1

Ara caldrà calcular l'energia mecànica en cada interval, composta per l'energia potencial i la cinètica.

$$Em = Ep + Ec$$

$$Ec = \frac{1}{2} * m * v^2$$

$$Ep = m * g * h$$

Per trobar l'energia potencial s'utilitzaran les coordenades “y” com a alçades, la gravetat de la Terra i s'utilitzaran els tres casos de pesos:

$$Ep = m * g(9.81) * h(PosY)$$

PosX	PosY	PosZ	ENERGIA POTENCIAL
[m]	[m]	[m]	[J]
-5.641646	12.070048	17.500702	296017.9272
-6.070964	12.01524	17.250382	294673.761
-6.491612	11.96048	16.985745	293330.772
-6.902839	11.905783	16.706684	291989.3281
-7.303789	11.851169	16.413035	290649.9197
-7.69348	11.796659	16.104588	289313.062

Taula 7: Energia potencial pel pes 1

En el cas de l'energia cinètica:

$$Ec = \frac{1}{2} * m * v^2$$

La massa és coneguda, però la velocitat és el que en falta.

Un cop introduïdes i desglossades per separat a totes les variables que influeixen en l'equació, s'ajusten totes, mitjançant l'expressió:

$$W_{nc} \text{ (treball no conservatiu)} = \Delta Em$$

$$W_{f_{terra}} + W_{f_{aire}} = \Delta Ec + \Delta Ep$$

$$W_{f_{terra}} - \Delta Ep = \Delta Ec - W_{f_{aire}}$$

$$W_{f_f terra} - \Delta E_p = \Delta E_c - W_{f_f aire}$$

$$W_{f_f terra} - (E_{pf} - E_{pi}) = (E_{cf} - E_{ci}) - W_{f_f aire}$$

A continuació es marcaran en vermell els valors coneguts.

Cal tenir en compte que es parteix d'una velocitat a l'inici de la baixada igual a la de la pujada, donada pel motor (2.2m/s):

$$W_{f_f terra} - (E_{pf} - E_{pi}) = (E_{cf} - E_{ci}) - W_{f_f aire}$$

I ara es desenvolupa:

$$W_{f_f terra} - (E_{pf} - E_{pi}) = (E_{cf} - E_{ci}) - W_{f_f aire}$$

$$\begin{aligned} W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) \\ = \left(\frac{1}{2} * m * v_f^2 - \frac{1}{2} * m * v_i^2 \right) - \left(-\frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * v_f^2 * d \right) \end{aligned}$$

Aïllant la velocitat final (vf):

$$\begin{aligned} W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) \\ = \left(\frac{1}{2} * m * v_f^2 - \frac{1}{2} * m * v_i^2 \right) - \left(-\frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * v_f^2 * d \right) \end{aligned}$$

$$W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) = \frac{1}{2} * m * v_f^2 - \frac{1}{2} * m * v_i^2 - \left(-\frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * v_f^2 * d \right)$$

$$W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) = \frac{1}{2} * m * v_f^2 - \frac{1}{2} * m * v_i^2 + \frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * v_f^2 * d$$

$$W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) + \frac{1}{2} * m * v_i^2 = \frac{1}{2} * m * v_f^2 + \frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * v_f^2 * d$$

$$W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) + \frac{1}{2} * m * v_i^2 = v_f^2 \left(\frac{1}{2} * m + \frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * d \right)$$

$$\frac{W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) + \frac{1}{2} * m * v_i^2}{\left(\frac{1}{2} * m + \frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * d \right)} = v_f^2$$

$$\sqrt{\frac{W_{f_f t} - (E_{pf} - E_{pi}) + \frac{1}{2} * m * v_i^2}{\left(\frac{1}{2} * m + \frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * d \right)}} = v_f$$

Simplificant:

$$\sqrt{\frac{Wf_f t - (E_{pf} - E_{pi}) + \frac{1}{2} * m * v_i^2}{\left(\frac{1}{2} * m + \frac{1}{2} * 1.15 * 1.2179625 * 4 * d\right)}} = v_f$$

$$\sqrt{\frac{Wf_f t - (E_{pf} - E_{pi}) + \frac{1}{2} * m * v_i^2}{\frac{1}{2} (m + 1.15 * 1.2179625 * 4 * d)}} = v_f$$

$$\sqrt{\frac{2 * \left(Wf_f t - (E_{pf} - E_{pi}) + \frac{1}{2} * m * v_i^2\right)}{(m + 1.15 * 1.2179625 * 4 * d)}} = v_f$$

$$\sqrt{\frac{2 * (Wf_f t - (E_{pf} - E_{pi}) + E_{ci})}{(m + 1.15 * 1.2179625 * 4 * d)}} = v_f$$

Com que no té massa sentit mostrar les taules dels primers instants perquè tots tenen la mateixa velocitat, es mostraran els instants a partir del qual es deixa anar la cadena:

PosX [m]	PosY [m]	PosZ [m]	VELOCITAT [m/s]
156.660609	82.872682	0	2.222222222
157.159549	82.841854	0	2.346869622
157.654776	82.773819	0	2.608885378
158.142972	82.666471	0	2.978998166
158.620009	82.517248	0	3.429560767
159.080804	82.323676	0	3.939099736
159.520546	82.086126	0	4.486674279

Taula 8: Velocitat pel pes 1

En groc, l'últim instant en que la cadena actua.

Un cop calculada la velocitat en cada interval, es pot trobar la força de fregament de l'aire:

PosX [m]	PosY [m]	PosZ [m]	FREGAMENT AIRE	
			FORÇA [N]	TREBALL [J]
156.660609	82.872682	0	27.6672963	13.83064562
157.159549	82.841854	0	30.85813505	15.42531913
157.654776	82.773819	0	38.13306783	19.06115363
158.142972	82.666471	0	49.72012598	24.85169881
158.620009	82.517248	0	65.89747185	32.93569561
159.080804	82.323676	0	86.93320732	43.44947697
159.520546	82.086126	0	112.7822703	56.37090729

Taula 9: Fregament amb l'aire pel pes 1

3.5.2 Forces G

Inicialment, els càlculs de les forces G es van realitzar amb Excel, però al veure uns resultats bastant il·lògics es va haver de buscar alternatives.

A partir d'aquí és on es va introduir el Phyton, per realitzar aquests càlculs. El canvi de programa va suposar haver de començar pràcticament de zero, ja que només es van poder aprofitar algunes dades de l'Excel.

Cal comentar que en tots els resultats mostrats a continuació, sempre s'inclou el número de referència, és a dir, el valor de la variable "temps" en el punt de càlcul "i" (tval[i]).

Per tant, es disposa dels punts que tracen el recorregut exportat d'NL2 com una corba en funció de la distància (s):

$$x(s), y(s) \text{ i } z(s)$$

L'objectiu és obtenir les acceleracions per determinar les forces G en cada instant del recorregut, a partir de les coordenades que tracen la corba. Per aconseguir-ho, s'haurà d'obtenir la posició de la vagoneta en funció del temps i derivar-la dues vegades.

$$\textbf{Objectiu: } x(t), y(t) \text{ i } z(t)$$

En l'apartat anterior, amb l'Excel i mitjançant la formulació d'energies, s'ha trobat la velocitat en cada punt, assumint que la velocitat era pràcticament constant en un interval determinat.

Per tant, es pot trobar el temps que tarda en anar d'un punt a un altre:

$$\text{Temps de } x_n \text{ a } x_{n+1} = \frac{\text{distància de } x_n \text{ a } x_{n+1}}{\text{velocitat}}$$

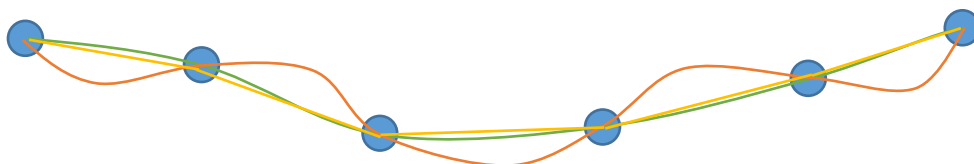
Per a les dues dades, s'utilitzarà la distància entre punts calculada a l'apartat anterior i la velocitat obtinguda, pel cas dos de pes (pes estàndard).

Així s'obté:

PosX [m]	PosY [m]	PosZ [m]	Distància recorreguda [m]	Temps [t]	Temps transcorregut [t]
-5.641646	12.070048	17.500702	0	0	0
-6.070964	12.01524	17.250382	0.499978	0.22499	0.22499
-6.491612	11.96048	16.985745	0.999954	0.224989	0.449979
-6.902839	11.905783	16.706684	1.499929	0.224989	0.674968
-7.303789	11.851169	16.413035	1.999902	0.224988	0.899956
-7.69348	11.796659	16.104588	2.499872	0.224986	1.124942

Taula 10: Posició temps

Ara bé, el que es té és una corba que en realitat és una unió de minúscules rectes. No se sap que passa entre un punt i un altre punt.



A continuació, s'ha elaborat un esquema dels splines

Amb els splines podem saber quina és la corba que uneix els punts



Utilitzant el Python, més en concret els splines, es pot determinar una corba que passi per tots els punts de la trajectòria. És a dir, obtenir una funció que permeti posicionar el vagó a la trajectòria en qualsevol instant del temps.

En matemàtiques, un spline és una funció polinòmica definida a trossos que interpola una sèrie de punts de forma que cada tros és un polinomi de grau n i a cada punt les derivades dels dos trossos que hi connecten tenen iguals les seves derivades fins a l'ordre $n-1$. És a dir, són corbes que poden ser emprades per la seva simplicitat i alhora es poden avaluar les funcions que les defineixen.

Dins de Python, es troben dins de la llibreria numpy que destaca per la seva facilitat amb les matrius multidimensionals.

Per tant, amb la funció dels splines cúbics es pot crear una corba que traci tots els punts:

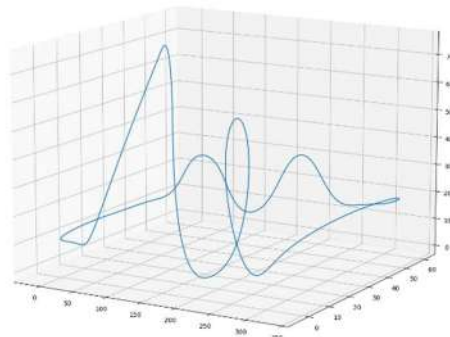
```
fx = interpolate.interpld(t, x)
f2x = interpolate.interpld(t, x, kind='cubic')
knew = np.linspace(0, kend, num=numpoints, endpoint=True)
fxn=f2x(knew)
```

```
numpoints=a escollir
kend=últim número (124.7)
```

I es repeteix l'operació per les coordenades y i z

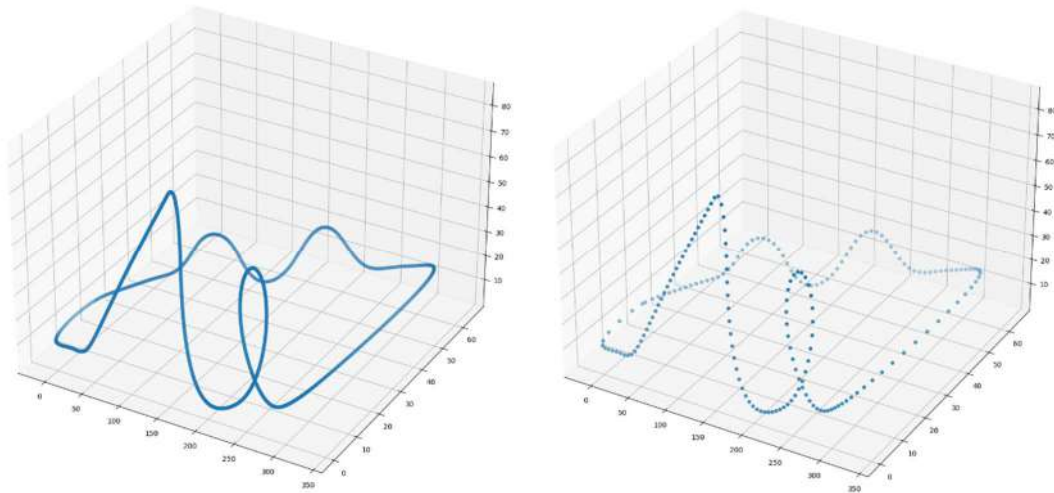
I per tant, s'obté una funció de grau molt alt que defineix tots els punts:

$$funció(t) = x(t), y(t) \text{ i } z(t)$$



Fotografia 87: Vista 3D de la funció

Un cop es té la funció es pot augmentar o disminuir el nombre de punts que conformen la corba, segons es desitgi.



Fotografia 88: Comparativa d'imatge amb nombre de punts elevat i baix

Per trobar les acceleracions, s'han de tenir en compte conceptes comentats anteriorment.

Primer de tot, cal saber què és el que es vol trobar: **l'acceleració tangencial i l'acceleració normal**.

Aquests components responen a les següents propietats:

Acceleració tangencial (A_t) → paral·lel a la velocitat

Acceleració normal (A_n) → perpendicular a la velocitat

Per poder continuar s'haurà de calcular el vector unitari de la velocitat. Per fer-ho, es derivaran els *splines*(t) = $x(t)$, $y(t)$ i $z(t)$ per tal de trobar la velocitat.

Utilitzant Python es pot derivar de dues maneres:

- Analíticament → hi ha llibreries que ho permeten, però no s'ha trobat la funció.
- Numèricament.

Numèricament, les fórmules resultants són:

$$x'(t) = \frac{x(t+h) - x(t)}{h}$$

$$y'(t) = \frac{y(t+h) - y(t)}{h}$$

$$z'(t) = \frac{z(t+h) - z(t)}{h}$$

on, h és un valor molt petit (diferencial) fixat per l'usuari.

```
for i in range(0,198):
    fpx = (f2x(tval[i] + h) - f2x(tval[i])) / h
    fpy = (f2y(tval[i] + h) - f2y(tval[i])) / h
    fpz = (f2z(tval[i] + h) - f2z(tval[i])) / h
```

```
tval=valors del temps
```

Els resultats obtinguts són:

tval[i] [s]	fpx [m/s]	fpy [m/s]	fpz [m/s]
1.2532663316582915	-1.5223429138287	-0.23977828445026894	-1.5960126503485998
1.8798994974874372	-1.286321744050177	-0.2361979029950394	-1.7904391841472158
2.506532663316583	-0.9827103856169952	-0.23058778740938557	-1.9724990644415623

Taula 11: Velocitat

Ara que s'ha obtingut la velocitat, es pot fer la segona derivada i obtenir l'acceleració

$$x''(t) = \frac{x(t+h) + (-2 * (x(t)) + x(t-h))}{h^2}$$

$$y''(t) = \frac{y(t+h) + (-2 * (y(t)) + y(t-h))}{h^2}$$

$$z''(t) = \frac{z(t+h) + (-2 * (z(t)) + z(t-h))}{h^2}$$

```
for i in range(0,198):
    fpx2=(f2x(tval[i]+h))+(-2*(f2x(tval[i])))+(f2x(tval[i]-h))/(h*h)
    fpy2=(f2y(tval[i]+h))+(-2*(f2y(tval[i])))+(f2y(tval[i]-h))/(h*h)
    fpz2=(f2z(tval[i]+h))+(-2*(f2z(tval[i])))+(f2z(tval[i]-h))/(h*h)
```

Els resultats obtinguts són:

tval[i] [s]	fpx2 [m/s ²]	fpy2 [m/s ²]	fpz2 [m/s ²]
1.2532663316582915	0.2636164934878549	-0.00295247300629597	-0.3000413041001692
1.8798994974874372	-0.3000413041001692	0.004990760742350275	-0.3087984728850763
2.506532663316583	0.45204590161032776	0.007952458269027574	-0.2978160097727507

Taula 12: Acceleracions

Ara, per obtenir l'acceleració tangencial s'haurà de calcular el mòdul del vector velocitat, a través de la següent fórmula:

$$\text{Mòdul vector velocitat} = \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2 + z'(t)^2}$$

També es calcularà el mòdul del vector acceleració, que serà útil després pel càlcul de l'acceleració tangencial i normal.

$$\text{Mòdul vector acceleració} = \sqrt{x''(t)^2 + y''(t)^2 + z''(t)^2}$$

```
for i in range(0,198):
    modvectvel=math.sqrt(fpx*fpx + fpy*fpy + fpz*fpz)
    modvectacc=math.sqrt(fpx2*fpx2 + fpy2*fpy2 + fpz2*fpz2)
```

I a partir d'això es podrà trobar la velocitat unitària, és a dir, de mòdul 1.

$$\text{Velocitat unitària } x = \frac{x'(t)}{\text{Mòdul vector velocitat}}$$

$$\text{Velocitat unitària } y = \frac{y'(t)}{\text{Mòdul vector velocitat}}$$

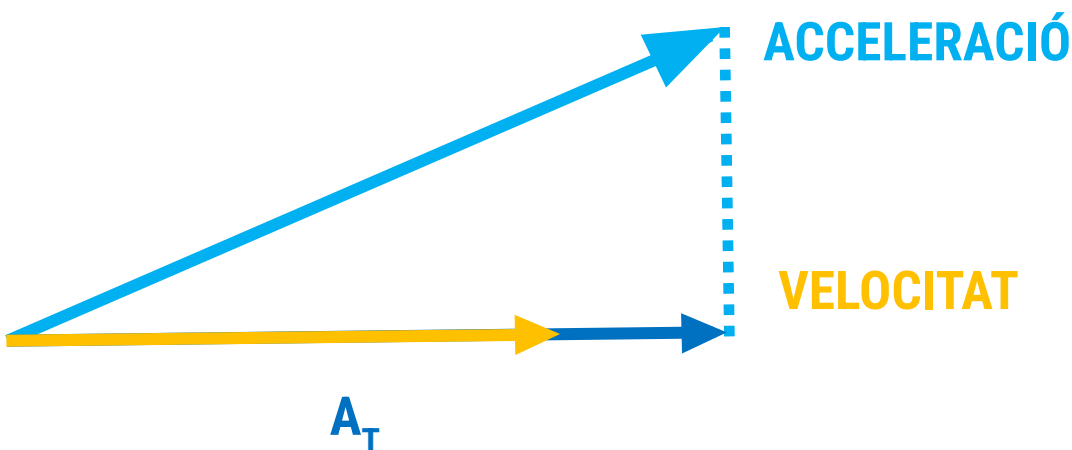
$$\text{Velocitat unitària } z = \frac{z'(t)}{\text{Mòdul vector velocitat}}$$

```
for i in range(0,198):
    velunitariax = fpx/modvectvel
    velunitariay = fpy/modvectvel
    velunitariaz = fpz/modvectvel
```

Ara mitjançant el producte escalar, es projecta el vector acceleració tangencial sobre la velocitat.

$$\overrightarrow{Velocitat} * \overrightarrow{Acceleració} = \|\overrightarrow{Velocitat}\| * \|\overrightarrow{Acceleració}\| * \cos \alpha$$

on, $\|\overrightarrow{Acceleració}\| * \cos \alpha$ és l'acceleració tangencial



Per tant si s'aïlla l'acceleració tangencial s'obté:

$$\frac{\overrightarrow{Velocitat} * \overrightarrow{Acceleració}}{\|\overrightarrow{Velocitat}\|} = \|\overrightarrow{Acceleració}\| * \cos \alpha = \text{Acc } tg$$

Prèviament s'ha trobat la velocitat unitària que correspon a :

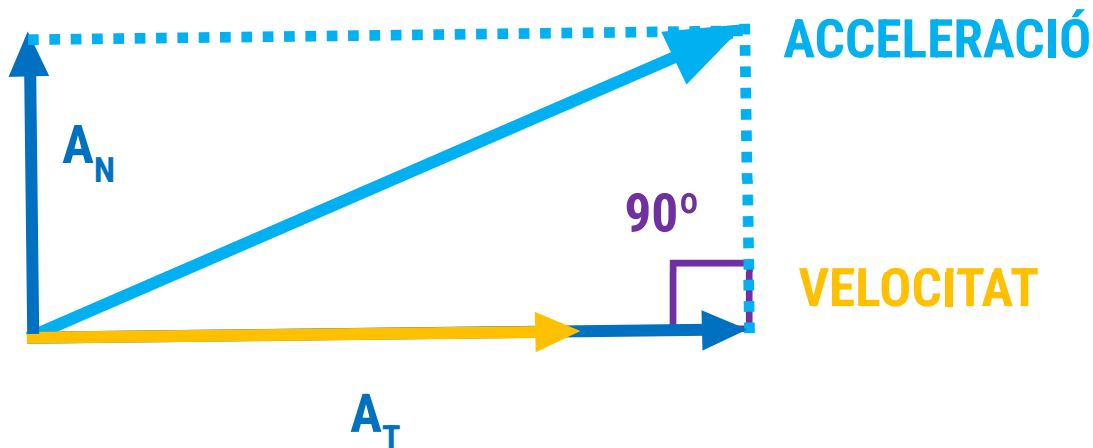
$$\frac{\overrightarrow{Velocitat}}{\|\overrightarrow{Velocitat}\|} = \text{Velocitat unitària}$$

Per tant només caldrà multiplicar l'acceleració.

$$Acc\ tg = vel.un.x * x''(t) + vel.un.y * y''(t) + vel.un.z * z''(t)$$

```
for i in range(0,198):
    acctg = (velunitariax*fpz2) + (velunitariay
    *fpy2)+(velunitariaz*fpz2)
```

I sabent l'acceleració tangencial, mitjançant el teorema de Pitàgores es pot obtenir l'acceleració normal, ja que entre aquestes acceleracions, normal i tangencial, hi ha un angle recte, de 90°:



$$Mod\ vec\ vel^2 = Acc\ norm^2 + Acc\ tg^2$$

$$Acc\ norm^2 = Acc\ tg^2 - Mod\ vec\ vel^2$$

$$Acc\ norm = \sqrt{Acc\ tg^2 - Mod\ vec\ vel^2}$$

```
for i in range(0,198):
    accnorm=math.sqrt((modvectacc*modvectacc)-(acctg*acctg))
```

Havent aconseguit les acceleracions es poden determinar les forces G:

$$Forces\ G\ linials = \frac{Acc\ tg}{9.81}$$

$$Forces\ G\ verticals = \frac{Acc\ normal}{9.81}$$

```
for i in range(0,198):
    Glin=acctg/9.81
    Gvert=accnorm/9.81
```

tval[i] [s]	Glin [G]	Gvert [G]
1.2532663316582915	0.0035308175777655376	0.0405610370500761
1.8798994974874372	0.004773824040066618	0.0472020379073682

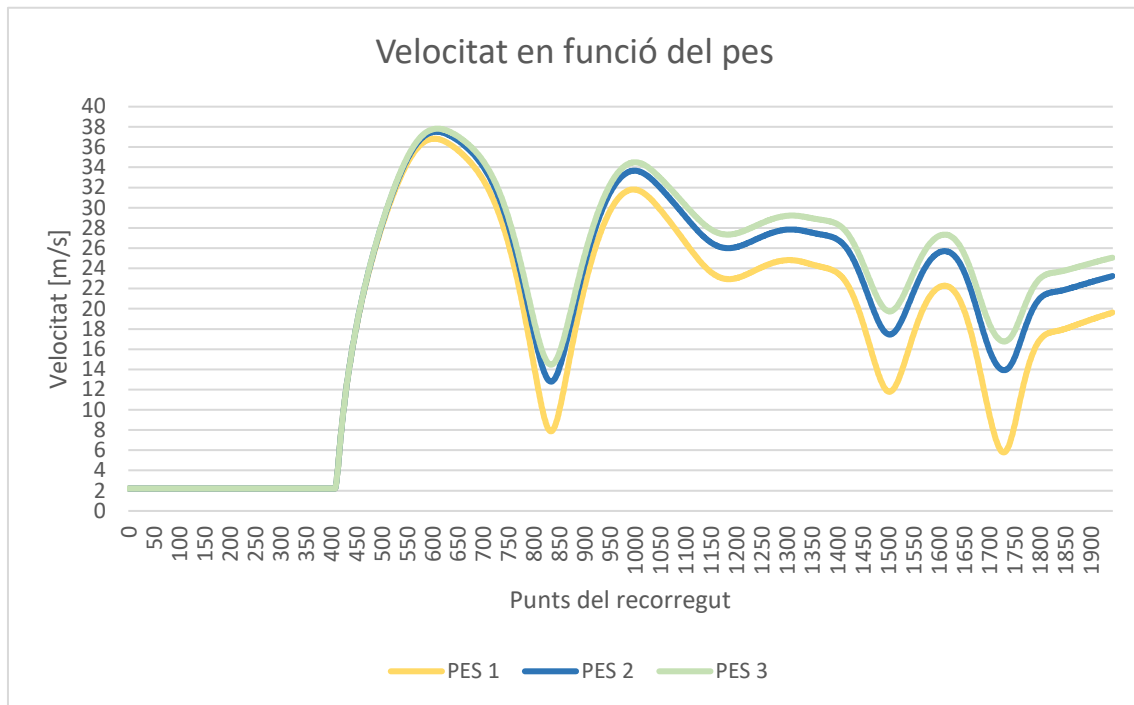
Taula 13: Forces G

3.5.3 Anàlisi dels resultats

A continuació s'extreu una anàlisi de la muntanya realitzada i dels resultats que s'han obtingut.

Pel que fa a la velocitat s'observa una evolució coherent i lògica.

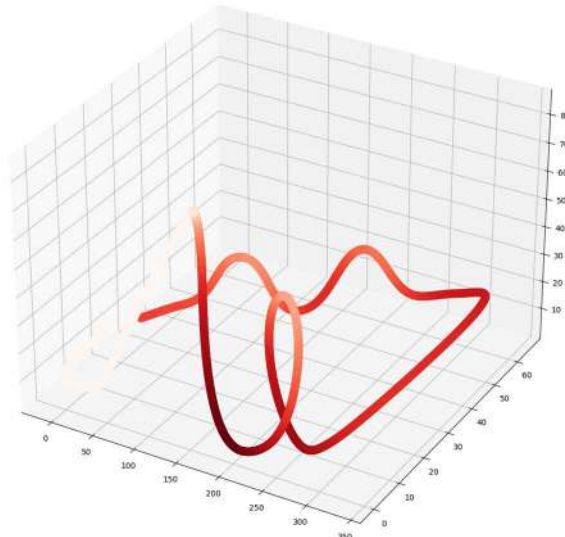
S'observa un pic de velocitat màxima després de la baixada forta de l'inici, seguit d'una baixada degut al Looping. Després del Looping, la velocitat va disminuint lentament.



Gràfic 1: Velocitat en funció dels diversos pesos, mitjançant Excel

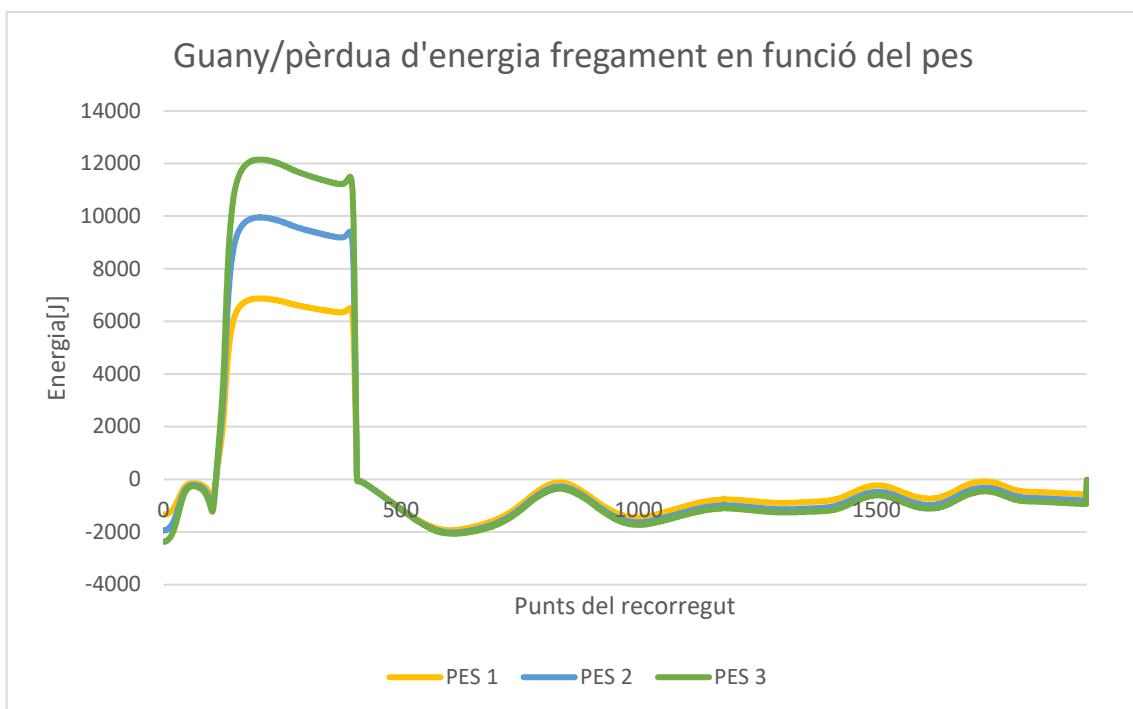
A partir d'això es pot observar que la massa que contingui el vagó no influeix notablement en el transcurs del recorregut. En tots tres casos s'assoleix arribar al final, i amb una velocitat més que de sobres.

Mitjançant Python es pot constatar els valors obtinguts als càlculs inicials. A la baixada s'assoleix el pic màxim de velocitat, a la part superior del Looping es redueix dràsticament i després torna a augmentar i disminueix lentament fins al final.

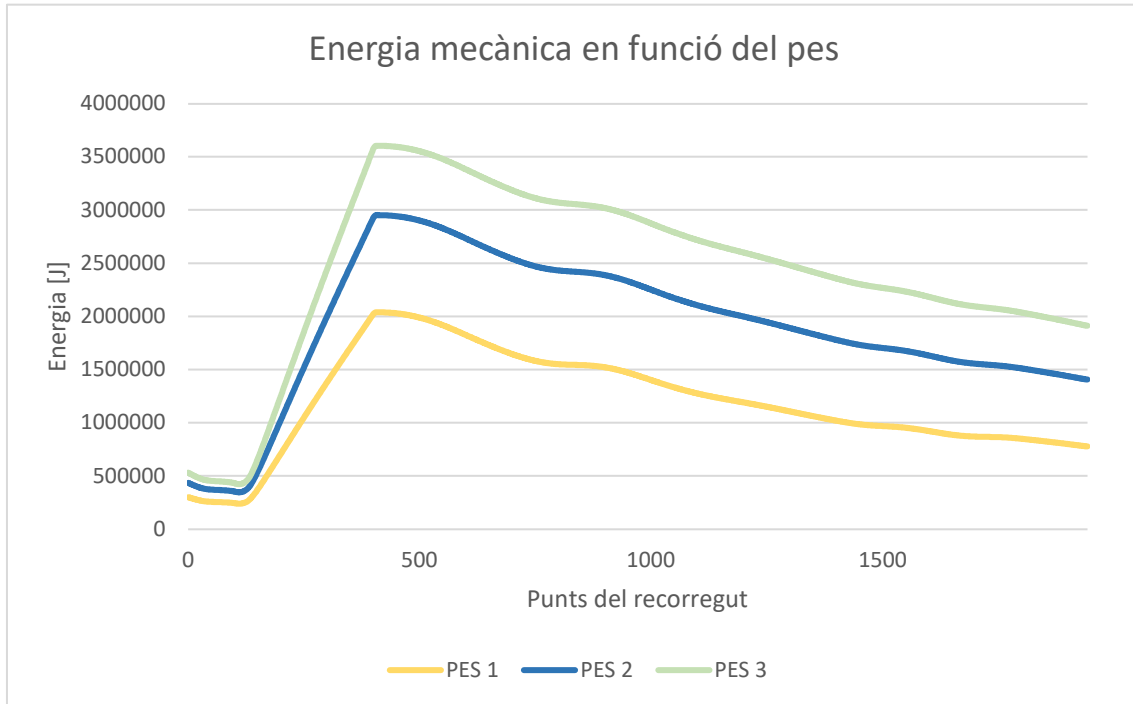


Gràfic 2: Velocitats, mitjançant Python

El mateix s'observa a partir dels dos gràfics següents, on es mostra l'energia en funció del pes. La pujada proporciona al vagó tota l'energia necessària per assolir el final. Al llarg del recorregut s'observa com aquesta es va perdent degut al fregament.



Gràfic 3: Pèrdua d'energia, mitjançant Excel



Gràfic 4: Energia mecànica, mitjançant Excel

El programa NL2, un programa professional, també ens proporciona dades de la velocitat. El software detecta una velocitat màxima de 136.38km/h al punt més baix de la baixada.

Els nostres càlculs realitzats en Excel n'indiquen el següent:

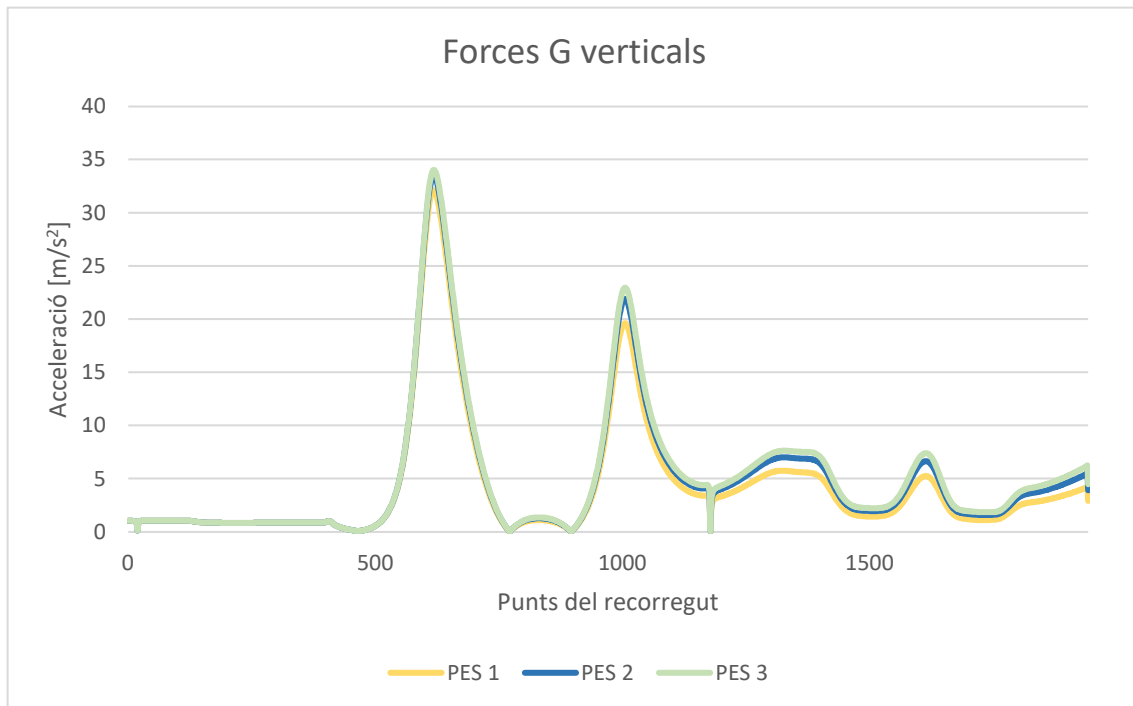
CAS		Velocitat màxima [km/h]
1	Només pes vagó	132.58
2	Vagó + 16 passatgers (70kg)	135.09
3	Vagó + 16 passatgers (120kg)	136.15

Taula 14: Velocitats màximes

Per tant, es pot observar que els càlculs han estat realitzats amb molta precisió, ja que els resultats varien ben poc.

Pel que fa a les forces G, és a dir, acceleracions tangencials i normals, s'han pogut observar diferents evolucions.

A partir del càlcul inicial, formulat a partir de les dades d'Excel, es podia observar que hi havia un error, ja que forces G tan elevades no eren possibles. Encara que els valors fossin erronis, es podia observar un patró al llarg del recorregut. Pics de forces a la baixada inicial i a la sortida del Looping.

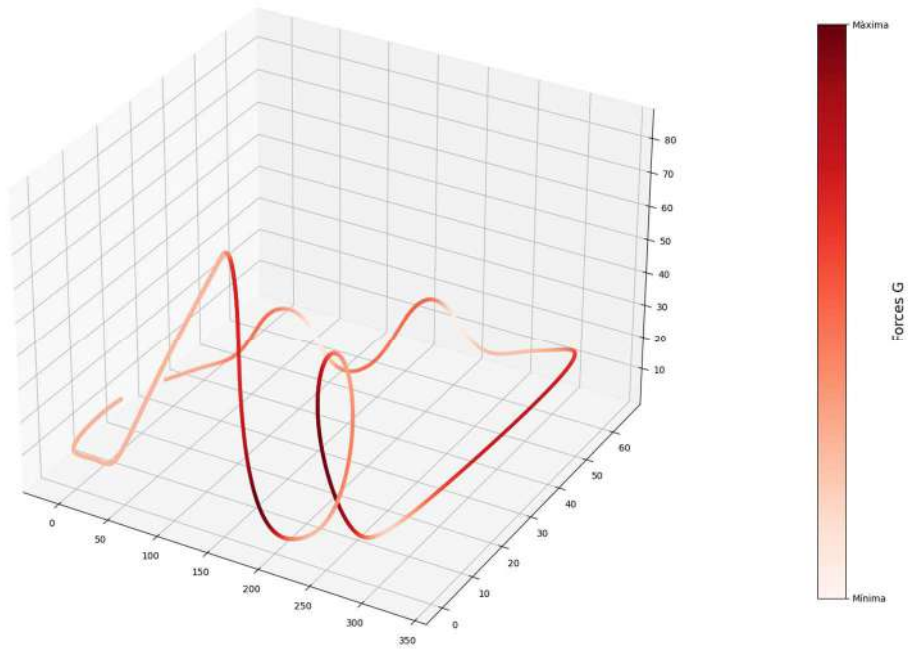


Gràfic 5: Forces G errònies

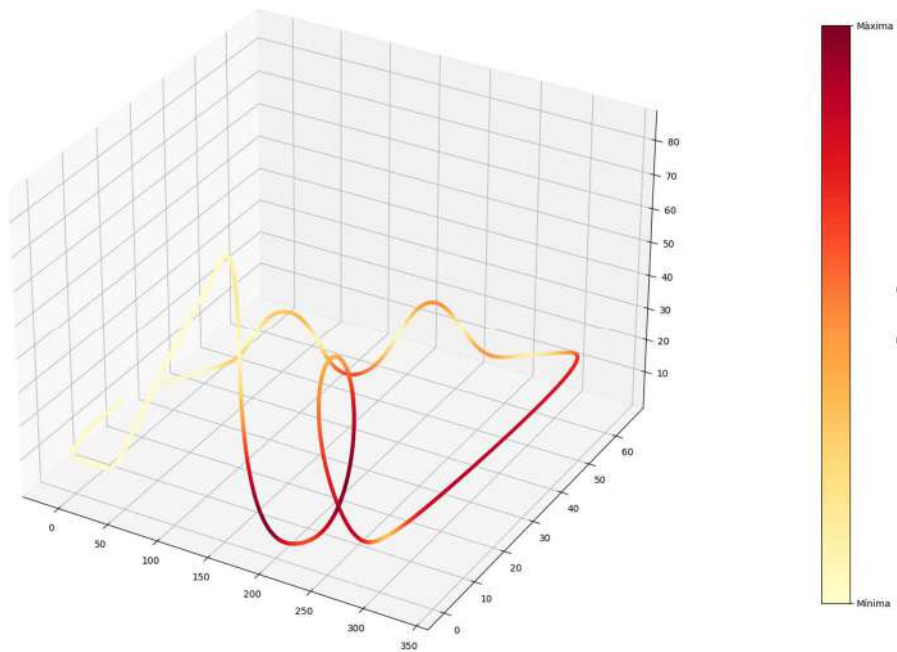
Amb l'ajuda del programa elaborat amb Phyton s'han refet els càlculs i pogut comprovar aquests patrons, obtenint valors més lògics.

NL2 també proporciona dades de les forces G. Els pics se situen a la part baixa de la baixada amb 5Gs verticals de màxima i a la sortida del Looping, amb 4Gs. També cal destacar que a la part alta dels turonets del final hi ha forces G inferiors a 1, cosa que provoca aquesta sensació d'ingravedesa.

A partir dels gràfics es pot observar com al final de la primera baixada el passatger patirà fortes forces G.



Gràfic 6: Forces G verticals



Gràfic 7: Forces G lineals

La principal diferència que s'observa entre les lineals i les verticals, és que les lineals actuen a l'inici del Looping i bastant a les pujades, mentre que les forces G verticals actuen sobretot després de les baixades.

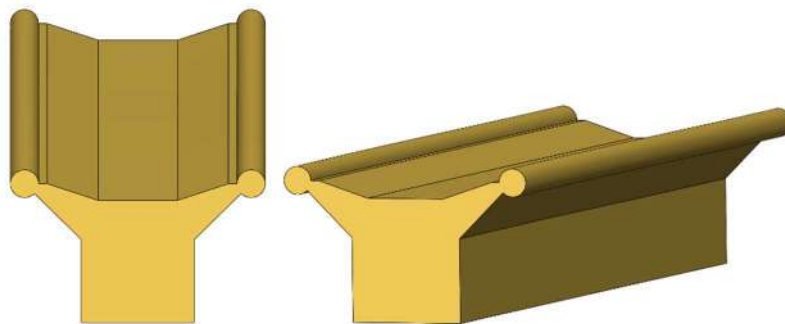
3.6 Disseny d'elements

El disseny dels elements és on tot l'aprenentatge i la feina anterior s'ajunten per idear i dissenyar peces i unions coherents i possibles de construir.

Les mides utilitzades en aquest apartat són en mil·límetres, ja que és el format que s'empra en la indústria i en la construcció mecànica.

3.6.1 Raïls

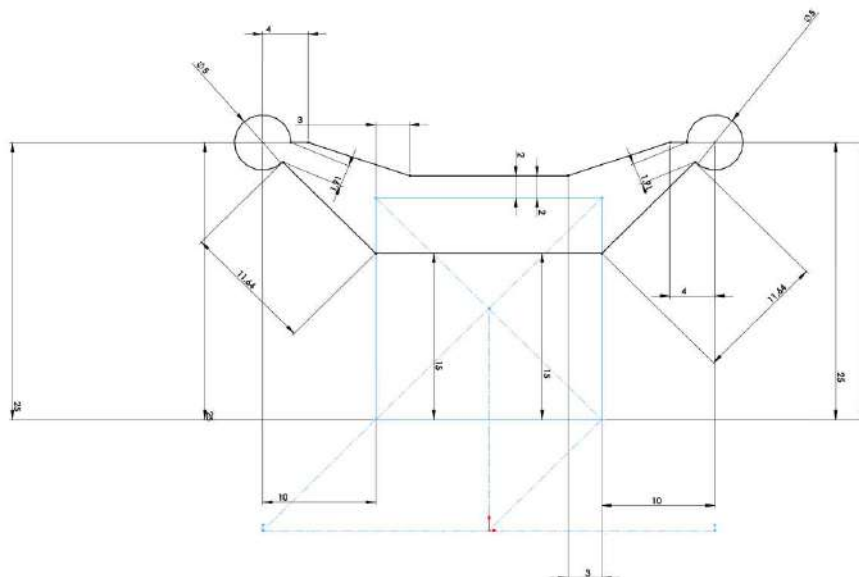
Els raïls escollits pel disseny d'aquesta muntanya han estat els de l'empresa Bolliger & Mabillard, que duen un quadrat com a columna vertebral, per la seva facilitat d'implementació en Solidworks i per la tipologia dels elements de la muntanya russa.



Fotografia 89: Disseny raïls
Font: Pròpia

Per tal de dissenyar els raïls, primer de tot s'ha hagut de dividir la trajectòria de la muntanya en diferents parts. En aquest cas, s'ha generat 32 peces que ajunten uns 60 punts cada una.

A l'hora de preparar el disseny el primer que cal és definir com ha de ser el raïl, per tal que tots segueixin el mateix patró. La base del disseny serà un quadrat de 20x20, sobre el que s'hi ubiquen els dos raïls amb les mesures de la següent imatge:



Fotografia 90: Disseny i mides del patró d'un raïl
Font: Pròpia

Un cop definida l'estructura només caldrà aplicar el disseny a totes les peces. Però no es tant senzill, ja cadascun dels raïls té el seu propi peralt. És per això que cada peça s'ha editat individualment.

Per tal d'unir les peces s'ha emprat un sistema molt senzill de mascle femella.

Al final d'una peça s'hi genera un forat, femella, i a l'inici de la següent s'hi disposa un piu, mascle, que a l'hora de muntar, encaixaran mecànicament.



Fotografia 91: Encaix entre peces
Font: Pròpia

Per a evitar les rugositats de la impressió i la discontinuïtat entre les diferents peces que conformen els raïls i, alhora, millorar el lliscament, la part que estarà en contacte amb les rodes es recobreix amb tub de poliuretà.

3.6.1.1 Tria de les mides de la maqueta

Per tal de decidir quines eren les mides òptimes que havia d'adoptar la maqueta, es van elaborar un seguit de proves.

Primer de tot es va passar el fitxer original als mil·límetres:

PosX [m]	PosY [m]	PosZ [m]	PosX [mm]	PosY [mm]	PosZ [mm]
-5.641646	12.070048	17.500702	-5641.646	12070.048	17500.702
-6.070964	12.01524	17.250382	-6070.964	12015.24	17250.382
-6.491612	11.96048	16.985745	-6491.612	11960.48	16985.745
-6.902839	11.905783	16.706684	-6902.839	11905.783	16706.684
-7.303789	11.851169	16.413035	-7303.789	11851.169	16413.035
-7.69348	11.796659	16.104588	-7693.48	11796.659	16104.588

Taula 15: Pas de metres a mil·límetres

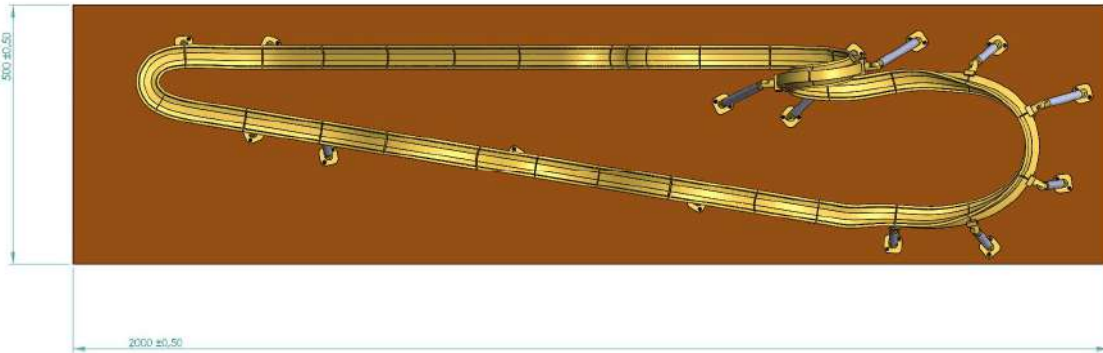
A partir d'això es van començar a fer proves. Amb la funció màxim, s'anava veient quines eren les mides màximes de cada escala provada.

Finalment es va optar per l'escala 1:200, on 1mm a la maqueta seran 200mm a la vida real.

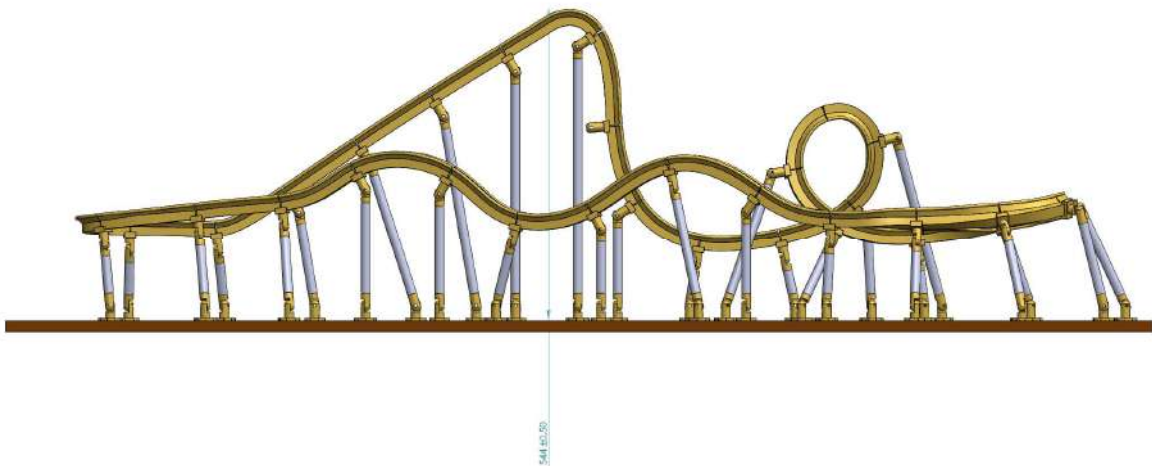
PosX [mm]	PosY [mm]	PosZ [mm]		
-28.2082	60.35024	87.50351		
-30.3548	60.0762	86.25191	X màx [mm]	1677.059535
-32.4581	59.8024	84.92873	Y màx [mm]	414.36341
-34.5142	59.52892	83.53342	Z màx [mm]	327.603525
-36.5189	59.25585	82.06518		
-38.4674	58.9833	80.52294		

Taula 17: Escala escollida

Això implica construir una maqueta de pràcticament 2000mm de llargada, 400mm d'amplada i poc més de 500mm d'alçada.



Fotografia 93: Mides
Font: Pròpia



Fotografia 92: Mides
Font: Pròpia

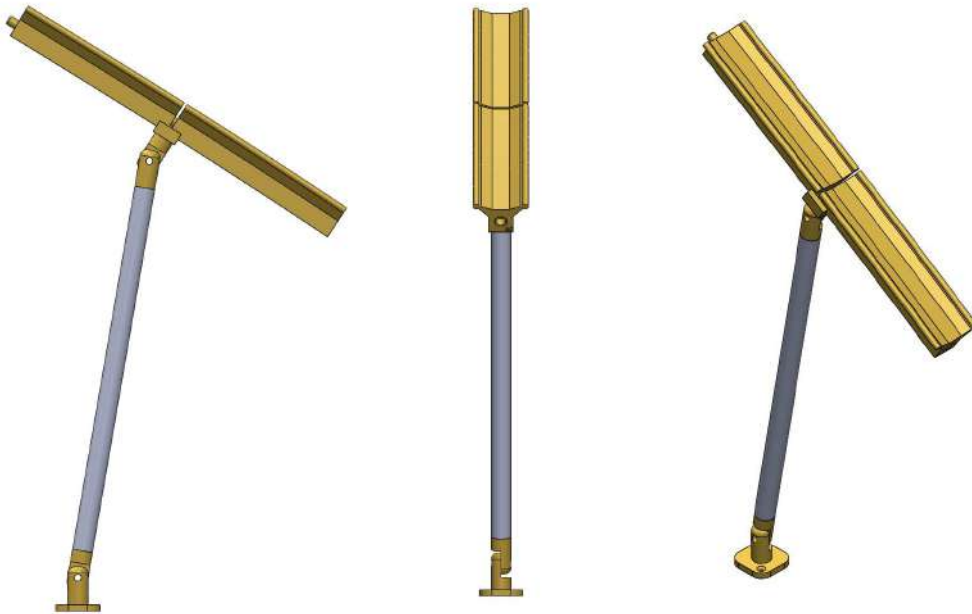
Partint d'aquestes dimensions, s'ha optat per utilitzar un taulell d'aglomerat de 2000x500x19mm com a base per aguantar totes les peces sobre el mateix pla.

3.6.2 Suports

Un cop realitzats tots els raïls es necessita dissenyar l'estructura d'unió i rigidització de la muntanya russa.

Es va pensar d'unir-los a partir d'un modelatge de suport a partir del raïl, però això implicava un disseny individual de cadascun dels raïls.

Havent vist la dificultat, s'ha definit un sistema de suports a partir d'una mena de pinces que es poden unir a la part inferior dels raïls.



Fotografia 94: Suport
Font: Pròpia

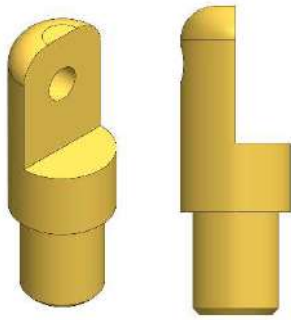
D'aquestes pinces en surt un braç que dona l'angle desitjat al suport, que s'uneix amb un suport a la part inferior.

Des del braç al suport s'ha utilitzat un tub de plàstic d'electricista.

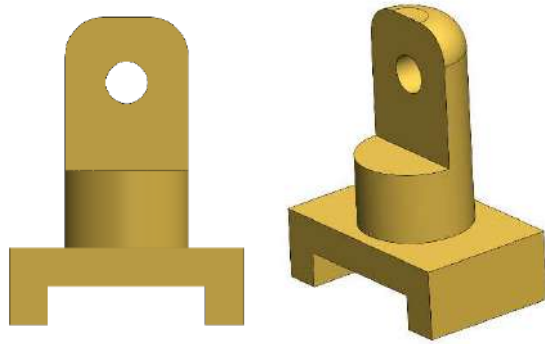


Fotografia 95: Tub del suports
Font: <https://www.mercantilelectrico.com/tubo-pvc-rigido-enchufable-libre-halogenos-m25-tira-3-metros-pvcIhm25.html>

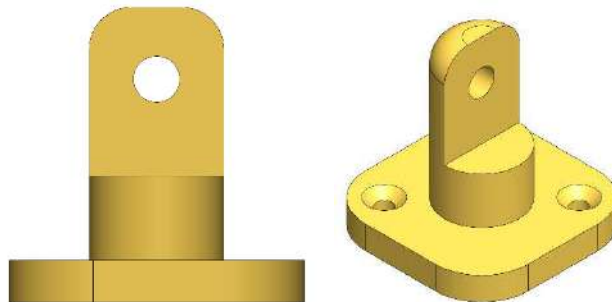
A continuació es mostren els detalls dels diferents suports dissenyats:



Fotografia 97: Piu que serveix per ajustar l'angle
Font: Pròpia



Fotografia 96: Pinça que enganxa raíl i suport
Font: Pròpia



Fotografia 98: Base del suport
Font: Pròpia

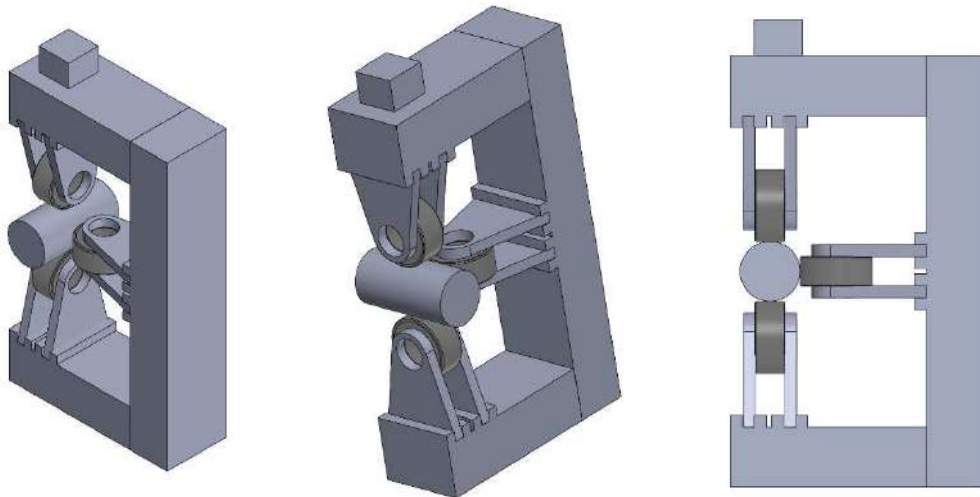
3.6.3 Vagó

S'ha optat per fer un vagó senzill, únicament com a una peça que permetés suportar les rodes i un pes que simulés els viatgers.

Primer de tot cal comentar que per rodes s'entén tot el conjunt de rodaments i peces que uneixen les vies i les rodes amb els seients.

De l'anàlisi de vagons existents s'ha comprovat que en les muntanyes russes s'utilitzen tres rodes, una superior, una inferior i una lateral, situades a 90º respectivament, per tal de poder subjectar-se el raíl en tots els elements de la muntanya.

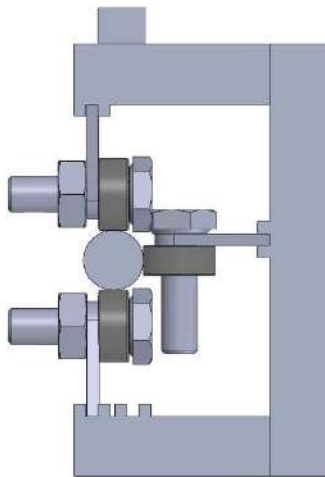
Les rodes estan basades en rodament de d.int 3mm, d.ext 6mm i gruix de 2.5mm



Fotografia 99: Diferents punts de vista del primer disseny de les rodes
Font: Pròpia

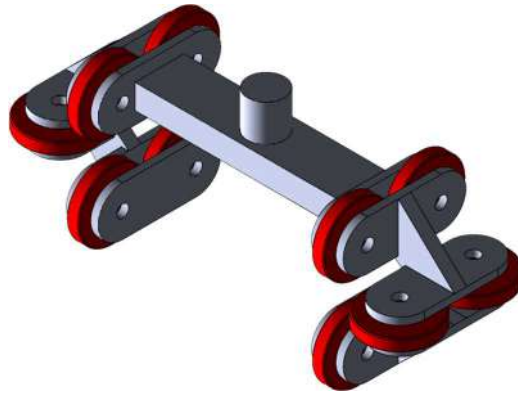
Aquest disseny tenia diversos problemes:

- El suport era molt gran per la infinitat de rodaments que havien d'aguantar.
- Els rodaments necessitaven ser subjectats amb cargols i femelles, per tant necessitarien ser collades i l'espai és molt petit per fer-ho.
- Es va provar d'inserir els cargols i es va observar que xocaven entre ells.



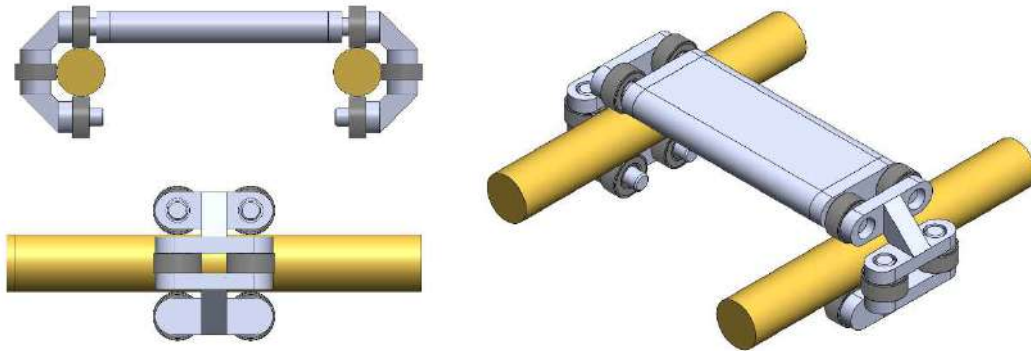
Fotografia 100: Error rodaments versió 1
Font: Pròpia

A partir de l'anàlisi dels problemes d'aquest conjunt i de la recerca es va trobar inspiració en un disseny trobat al web.



Fotografia 101: Disseny d'internet
Font: <https://grabcad.com/library/roller-coastor-car-1>

A partir d'aquesta imatge es va dissenyar un model una mica més acurat i petit.
El resultat va ser el següent:

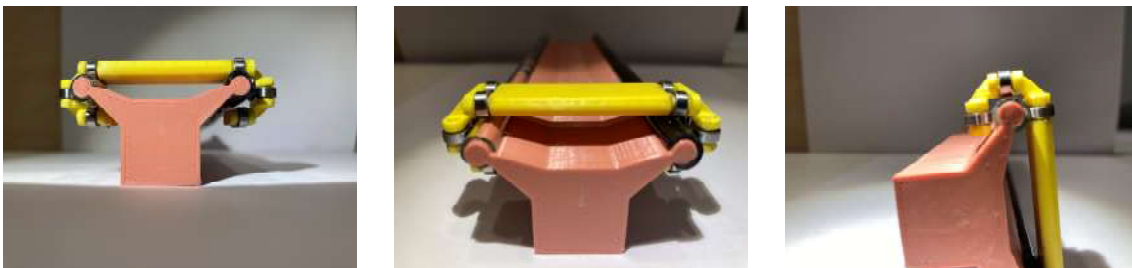


Fotografia 102: Rodaments versió 2
Font: Pròpia

A partir d'aquest punt es van anar imprimint les peces i fent diverses proves.

Sols va caldre variar diàmetres i llargades, ja que no s'havia tingut en compte l'error de la impressora 3D i el gruix del filament.

Es va afegir un tub de poliuretà per evitar les vibracions de la impressió 3D.



Fotografia 103: Rodaments
Font: Pròpia

3.7 Construcció de la maqueta

Per fer la construcció de la maqueta s'ha realitzat per impressió en 3D.

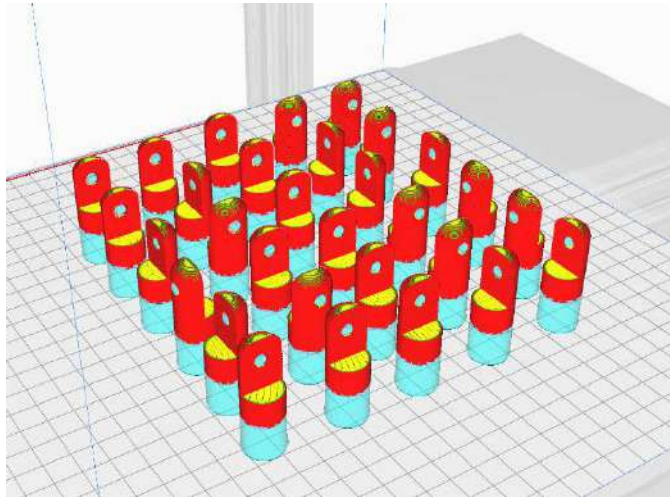
S'han exportat les peces dissenyades a SolidWorks en format .stl. D'aquesta manera podien ser introduïdes a Cura i preparar una impressió.

A Cura es poden definir molts paràmetres, gruix de capa, temperatura,... però s'han utilitzat models predeterminants. D'aquest programa s'obté un arxiu en format Gcode, que és el que llegeix la impressora.

Les peces que s'imprimeixen no estan plenes al 100%, només un 20 o 30% segons la peça.

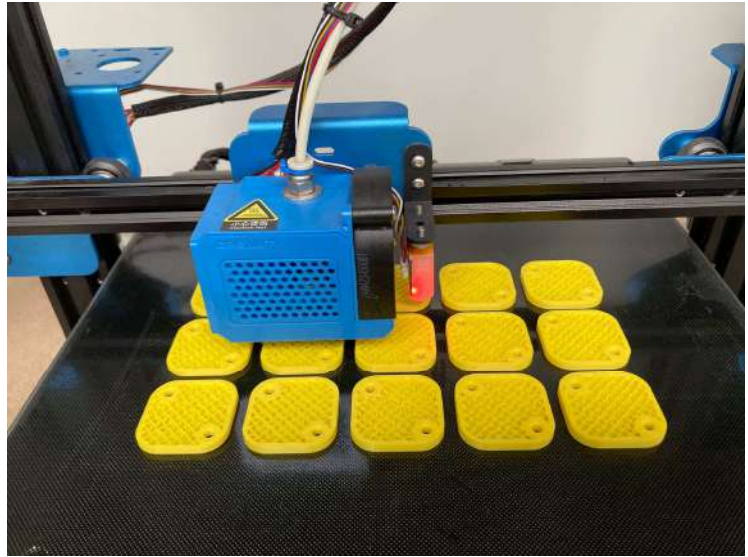
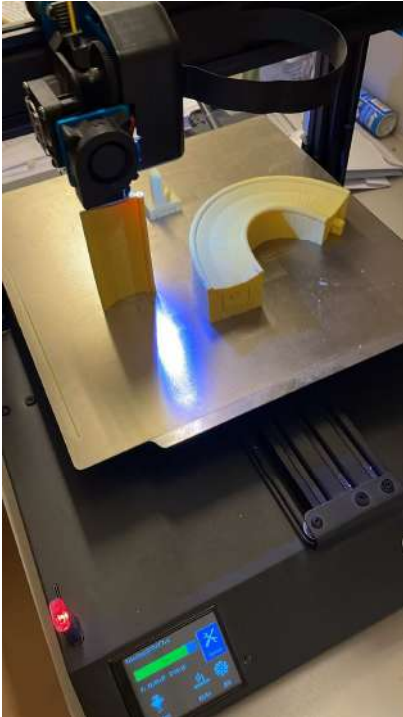
El programa també calcula les hores que durarà la impressió i quant de filament es necessitarà.

S'ha imprès en filament de PLA de 1.75mm, ja que la impressora que s'utilitzava requeria aquest estil de component.



Fotografia 104: Disseny estampació 3D amb Cura
Font: Pròpia

A continuació s'adjunten un parell de fotografies del procés d'impressió en 3D.

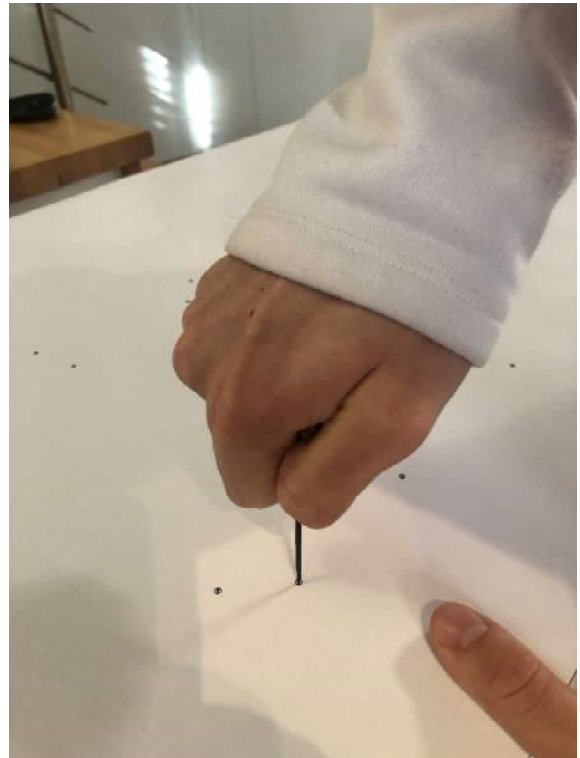


Fotografia 105: Impressió 3D
Font: Pròpia

Un cop les peces han estat impreses, s'han marcat els punts sobre la base de fusta amb una barrina.

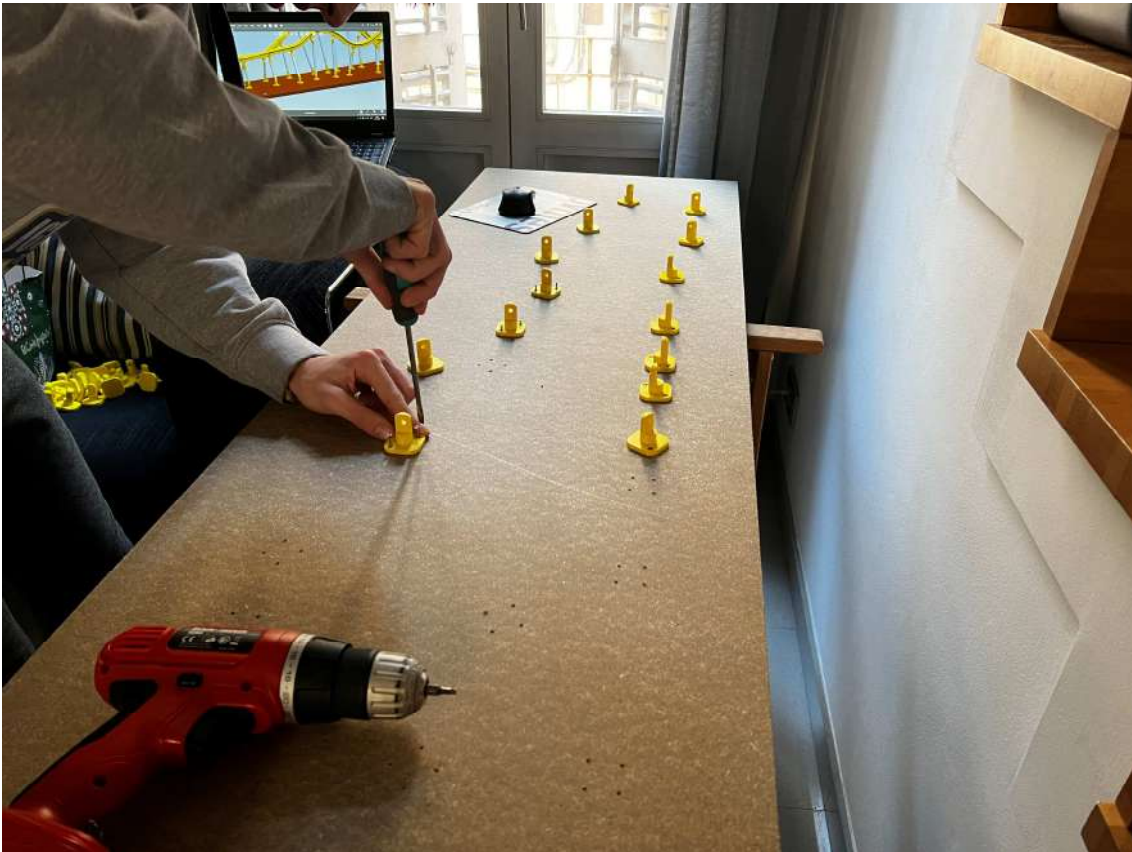


Fotografia 107: Col·locació de plantilla amb els forats del suports



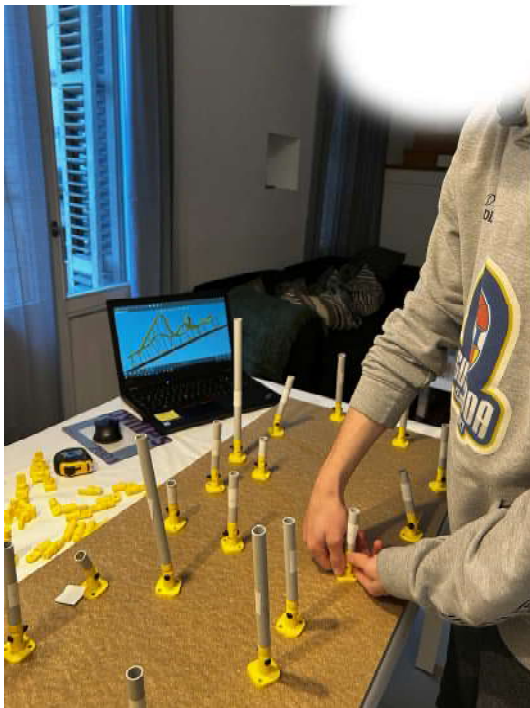
Fotografia 106: Realització dels forats

A continuació s'han collat els suports a la base.



Fotografia 108: Bases collades a la base

Seguidament, s'han muntat els tubs que conformen l'estructura i s'han afegit les primeres peces.



Fotografia 110: Muntatge dels tubs



Fotografia 109: Unió de suports i peces

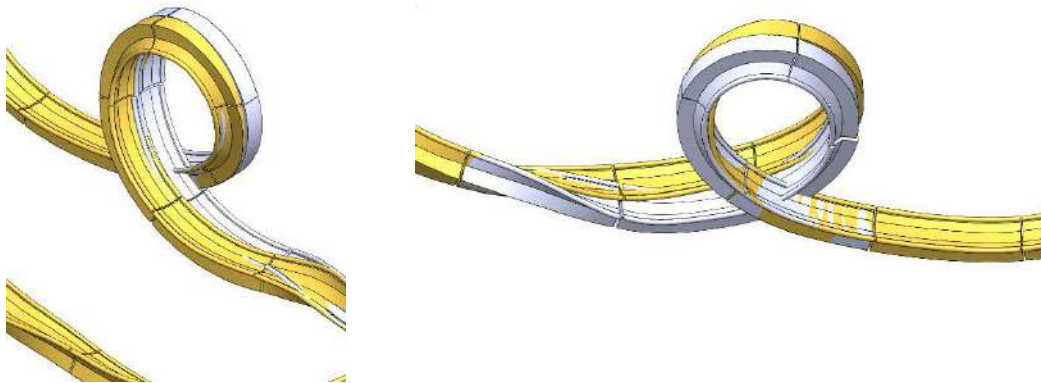


Fotografia 111: Resultat final de la maqueta

3.8 Problemes

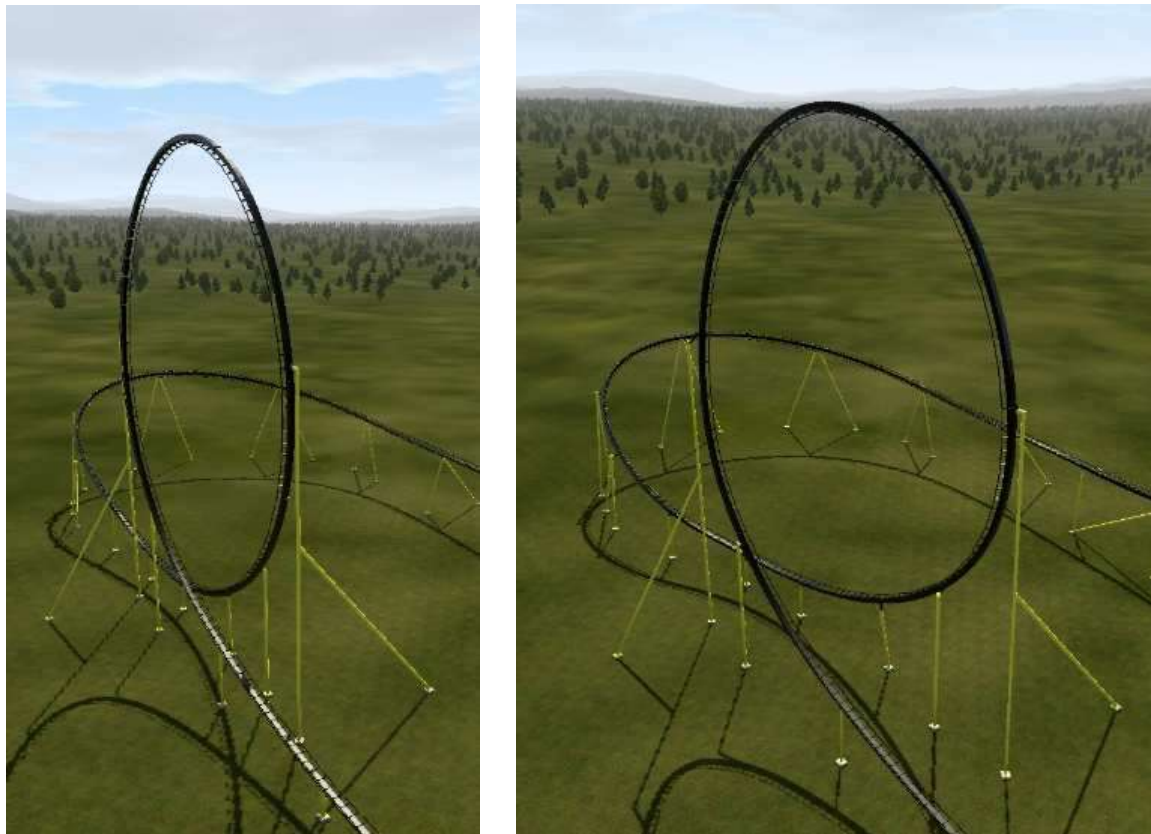
3.8.1 Problemes d'escala

En dissenyar la maqueta es va detectar un error que no s'havia pogut observar anteriorment, i és que en el Looping, la muntanya s'interseccionava entre si mateixa, per tant fent impossible el transcurs del vagó i tampoc feia possible la seva construcció.



Fotografia 112: Error i versió definitiva juntes
Font: Pròpia

Això va ser degut a canviar l'escala dels raïls, però no del vagó, ja que depenia de la mida dels rodaments. Per tant, el raïl anava en funció del vagó i no de l'escala.



Fotografia 113: Comparació versió original i versió modificada
Font: Pròpia

Per tal d'evitar refer tots els càlculs, es va dissenyar una muntanya alternativa, que simplement variava una mica la distància entre els raïls del Looping, fent possible el seu recorregut. A més a més només caldria redissenyar les peces del Looping, ja que la resta seguirien el recorregut normal.



Fotografia 114: Comparació versió original i versió modificada
Font: Pròpia

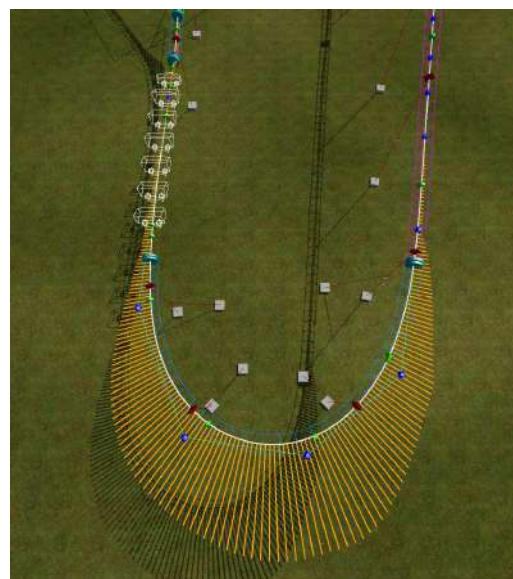
3.8.2 Radi curvatura

El radi de curvatura és una magnitud que defineix si una corba és més oberta o més tancada.

En el treball no s'havia tingut en compte fins que els amics de Discord van comentar-ho. Ells, experts en el tema, asseguraven que la vagoneta no aconseguiria passar per les corbes degut a ser excessivament tancades, radi de curvatura molt petit.

A posteriori, es va veure que NL2 també incloïa una funció que et definia les zones amb un radi de curvatura més petit, per tant més difícil de realitzar.

No es va ser a temps per modificar l'error.



Fotografia 115: Radi de curvatura corba estació
Font: NL2

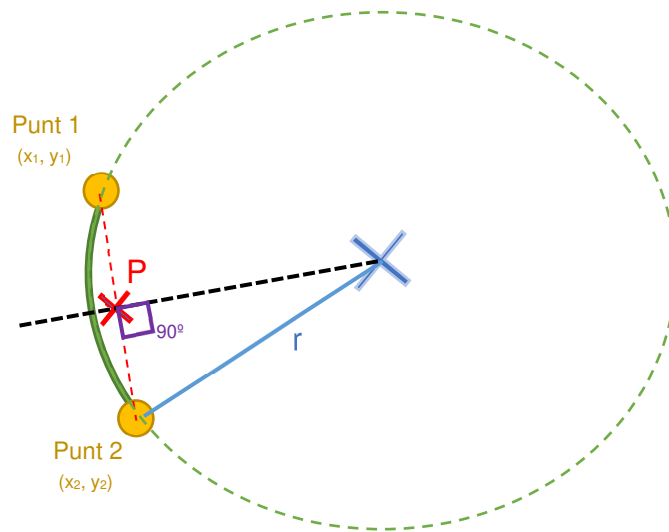
3.8.3 Forces G Excel

Un cop es van trobar totes les velocitats, es va pensar que es podria calcular les forces G mitjançant Excel.

Les forces G es poden calcular mitjançant el radi d'una corba i la seva velocitat. Per tant només es necessitava trobar el radi entre dos punts, per poder aplicar la fórmula.

Per fer-ho, s'havia dissenyat una equació a partir de trobar el punt mig entre dos punts. A partir d'això, generar un triangle i buscar-ne la hipotenusa.

A part de possibles errors en els càlculs, un dels inconvenients va ser no tenir en compte les 3 coordenades, ja que la fórmula sols emprava x i y.



Els punts 1 i 2 són valors coneguts.

P es pot trobar mitjançant:

$$P = \frac{Punt_1 + Punt_2}{2} = \frac{(x_1, y_1) + (x_2, y_2)}{2}$$

$$P_x = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

$$P_y = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

$$Vector\ director_{1-2} = (x_1 - x_2, y_1 - y_2)$$

$$Vector\ director\ perpendicular_{1-2} = (y_2 - y_1, x_1 - x_2)$$

I a partir d'això es troba la recta que passa per P i té com a vector director el perpendicular respecte d'1-2.

$$(x, y) = P + \lambda * \text{Vector director perpendicular}_{1-2}$$

$$(x, y) = \frac{(x_1, y_1) + (x_2, y_2)}{2} + \lambda * (y_2 - y_1, x_1 - x_2)$$

$$\lambda = \frac{x - \left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right)}{y_2 - y_1} = \frac{y - \left(\frac{y_1 + y_2}{2}\right)}{x_1 - x_2}$$

I a partir d'aquests resultats es pot trobar el radi, hipotenusa del triangle, i trobar la força G.

El resultat ha estat el següent:

$$y_{radi} = \frac{[(x_2^2) + (y_2^2) - (x_1^2) - (y_1^2)] * (x_1 - x_2) + (y_2 + y_1) * (y_2 - y_1) * (-x_1 + x_2) - (x_1 + x_2) * (x_1 - x_2) * (-x_1 + x_2)}{2 * (y_2 - y_1) * (-x_1 + x_2) - ((-2 * y_2 + 2 * y_1) * (x_1 - x_2))}$$

$$x_{radi} = \frac{[(x_2^2) + (y_2^2) - (x_1^2) - (y_1^2) - 2 * y_2 * y_{radi} + 2 * y_1 * y_{radi}]}{(-2 * x_1 + 2 * x_2)}$$

$$radi = \sqrt{(x_1 - x_{radi})^2 + (y_1 - y_{radi})^2}$$

Aquesta fórmula va ser implementada a Excel, i en aplicar-la es va observar que hi havia trams amb forces G molt elevades.

PosX [mm]	PosY [mm]	PosZ [mm]	Força G [G]
205.229563	4.522915	0.000000	31.4789338
205.728534	4.490888	0.000000	31.67726774
206.227794	4.463726	0.000000	31.8394704
206.727288	4.441290	0.000001	31.96571875
207.226968	4.423435	0.000001	32.05647735
207.726786	4.410016	0.000002	32.11244113

Taula 18: Forces G calculades amb Excel

3.8.4 Peralt

És necessari comentar que alhora de fer els càlculs no s'ha tingut en compte el peralt en cap moment.

3.8.5 Python

A l'hora de fer els càlculs de les acceleracions mitjançant les derivades dels splines, es va trobar un problema.

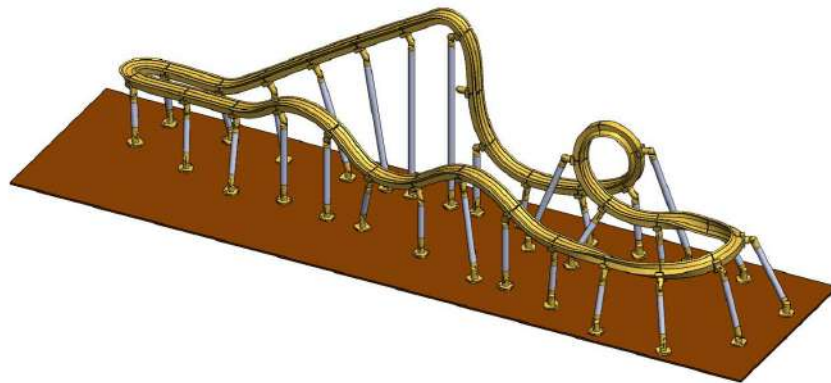
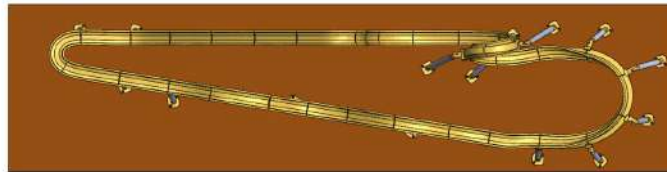
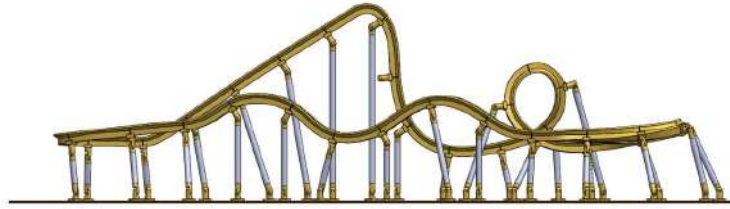
Per algun motiu que encara avui en dia es desconeix, a l'aplicar una h (diferencial) molt petita, els valors donaven números monstruosos i incomprensibles. Sabíem que es podria patir alguna mena d'error el fet d'emprar el mètode numèric, però no obtenir nombres tan grans.

Se suposava que la h podia prendre valors minúsculs, però finalment es va utilitzar h=1, que donava nombres decents.

$$x''(t) = \frac{x(t+h) + (-2 * x(t)) + x(t-h)}{h^2}$$

3.9 Resultat final

La unió de tots els elements esmentats anteriorment han esdevingut en la muntanya següent:



Fotografia 116: Conjunt de la muntanya
Font: Pròpia



Fotografia 117: Maqueta

3.10 Pressupost

A continuació es detallen les despeses que ha suposat la realització de la maqueta de la muntanya russa.

CONCEPTE	REFERÈNCIA	PREU UNITAT	QUANTITAT	PREU TOTAL
SOFTWARE				
Llicència NoLimits2	NoLimits2 Standard for Windows PC	35.99 €/uds	1 uds	35.99 €
IMPRESSIÓ 3D				
Hores impressió		2.00 €/h	250 h	500.00 €
Filament PLA 1.75mm	PLA175yl1000	20.47 €/uds	3 uds	61.41 €
MUNTATGE				
Placa base	Fusta aglomerat 2000x500x19	20.75 €/uds	1 uds	20.75 €
Cargol fusta DIN 571	2.5x20	0.05 €/uds	90 uds	4.20 €
Femella DIN 934	M5 pavonat	0.02 €/uds	75 uds	1.50 €
Volandera DIN 125	M5 pavonat	0.01 €/uds	75 uds	0.75 €
Cargol DIN 7380	M5x25 pavonat	0.06 €/uds	75 uds	4.50 €
Rodaments	Rodaments de boles en miniatura 3x6x2.5mm	0.91 €/uds	20 uds	18.18 €
Cola	Superceys Pincel 5GR	5.06 €/uds	1 uds	5.06 €
Tub	D.ext16*D.int12	4.85 €/uds	2 uds	9.70 €
TOTAL				662.04 €

4. VALORACIÓ PERSONAL/CONCLUSIÓ

Donant un cop d'ull als objectius plantejats a l'inici d'aquest treball, penso que en gran mesura s'han aconseguit.

He descobert, conegut i après del fascinant món que ens envolta, no només pel fet del meu aprenentatge sinó perquè hi ha gent que dedica part del seu temps en ajudar-te en el treball i això m'ha sorprès, però alhora encantat.

Crec que he aconseguit explicar detalladament tots els càlculs sense omplir excessivament la memòria de fórmules, fent així un treball amè i fàcil de llegir.

El fet que sigui comprensible a tothom també ho he fet prou bé, utilitzant llenguatge tècnic només en llocs imprescindibles. Potser la part del Python és una mica més feixuga, però la resta genial.

El fet d'haver aconseguit construir en escala reduïda una muntanya dissenyada única i exclusivament per mi, és quelcom del que n'estic molt orgullós. Penso que he fet un treball molt digne d'un alumne de 2n de Batxillerat i que he tocat àmbits que en un futur em podran servir.

Entendre i utilitzar decentment tot el programari que he utilitzat no ha estat feina fàcil. Han calgut hores i hores d'anar a poc a poc i veure com la gent professional utilitza aquesta mena de softwares i aprendre'n d'ells.

Crec que he tingut un problema i s'ha anomenat les idees. Dia rere dia se m'anaven acudint més i més idees esbojarrades per afegir a la meva muntanya. Això ha provocat que anés iniciant "minirecerques" i després els abandonés perquè m'atreia un de més apassionant o divertit dins del treball. No he sabut on aturar-me i mai m'ha falta feina.

Relacionat amb això, he hagut de reduir el treball a simplement una maqueta. S'havia pensat de fer un sistema de frenada i un sistema perquè autònomament s'assolís la part superior de la pujada, però era una idea massa agosarada.

Tampoc s'ha assolit que el vagó aconseguir traçar el recorregut complert. Possiblement això necessita més proves amb materials, formes, dimensions,... que podria ser un altre treball de recerca.

La principal problemàtica podria ser la fricció amb les rodes, tot i l'ús de tub per reduir el fregament. També l'ús d'un vagó de massa tan petita, ja que al no tenir prou pes no guanya suficient velocitat a la baixada per recórrer tota la trajectòria.

Es va fer una prova llençant una pilota de golf des de la part superior de la muntanya, i es va poder observar com arribava fins a la corba, tot i que al no estar subjecte als rails va sortir de la via. Això ens duu a pensar que la falta de pes és significativa, ja que la pilota pesa bastant més que el vagó utilitzat.

Per últim, durant aquest treball m'he adonat que m'encanta posar fotografies per tot arreu.

5. AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair al meu tutor del Treball de Recerca, [REDACTED], per la seva orientació constant, la implicació i l'ajuda tècnica, que han estat essencials.

També un agraïment molt sincer a l'[REDACTED] per la seva gran ajuda i orientació en el món del Phyton. Ha estat com el meu segon tutor.

Als meus pares per la seva implicació, i pels ànims ininterromputs. M'han ajudat sempre que ha calgut, han intentat comprendre'm i m'han ajudat molt a veure que no hi havia temps per tot. La seva experiència m'ha ajudat a guiar el treball de manera òptima.

A en [REDACTED], perquè va ser ell qui em va respondre la primera entrevista i també va ser ell qui em va donar accés al Discord, on un grup d'experts sobre el tema m'han ajudat sempre que ho he necessitat.

A l'[REDACTED], per tenir ininterrompudament la seva impressora ocupada.

A tots aquells que d'alguna manera o d'una altra m'han ajudat, encara que el seu nom no figuri de forma explícita en aquestes línies.

6. TAULES DE CONTINGUTS

6.1 Fotografies

Fotografia 1: Les muntanyes russes.....	8
Fotografia 2: <i>Promenades Aériennes</i>	9
Fotografia 3: <i>Switchback</i>	9
Fotografia 4: <i>Flip Flap Railway</i>	9
Fotografia 5: <i>Matterhorn Bobsleds</i>	10
Fotografia 6: Muntanya de fusta.....	11
Fotografia 7: Muntanya d'acer.....	11
Fotografia 8: Wild Mouse esquelet.....	12
Fotografia 9: Bolliger & Mabillard esquelet.....	12
Fotografia 10: Intamin i Gerstlauer eurofighter esquelet.....	12
Fotografia 11: Unique track esquelet.....	12
Fotografia 12: <i>Red Force</i> , acceleració magnètica.....	13
Fotografia 13: Esquema 1 acceleració magnètica.....	13
Fotografia 14: Esquema 2 acceleració magnètica:.....	14
Fotografia 15: <i>Kingda Ka</i> , acceleració hidràulica.....	14
Fotografia 16: Esquema llançament hidràulic.....	14
Fotografia 17: Cadena.....	15
Fotografia 18: Elevació per cadena.....	15
Fotografia 19: Sistema d'antiretorn.....	15
Fotografia 20: Arnès per la cintura.....	16
Fotografia 21: Arnès per les espatlles.....	16
Fotografia 22: Raïl.....	17
Fotografia 23: Vagó.....	17
Fotografia 24: Suports de metall.....	18
Fotografia 25: Suports de fusta.....	18
Fotografia 26: Corba peraltada.....	19
Fotografia 27: Corba superperaltada.....	19
Fotografia 28: Turonet.....	19
Fotografia 29: Minituronets.....	20
Fotografia 30: Top Hat.....	20
Fotografia 31: Looping.....	20
Fotografia 32: Looping inclinat.....	21
Fotografia 33: Looping cap avall.....	21
Fotografia 34: Tirabuixó.....	21
Fotografia 35: Zero-G Roll.....	22
Fotografia 36: Cobra Roll.....	22
Fotografia 37: Banana Roll.....	22
Fotografia 38: Pinces frens d'aleta.....	23
Fotografia 39: Frens magnètics.....	23
Fotografia 40: Frens pneumàtics.....	24
Fotografia 41: Estació amb molta cua.....	24
Fotografia 42: <i>Kingda Ka</i> , la muntanya més alta del món.....	25
Fotografia 43: <i>Formula Rossa</i> , la muntanya amb una pic de velocitat més elevada del món.....	25

Fotografia 44: <i>The Smiler</i> , l'atracció amb més inversions del planeta.....	26
Fotografia 45: <i>Steel Dragon 2000</i> , muntanya més llarga del món	26
Fotografia 46: Direcció forces G.....	28
Fotografia 47: Resistència a les forces G	29
Fotografia 48: Poma al cap de Newton.....	29
Fotografia 49: Coeficient d'arrossegament	32
Fotografia 50: Triangle raons trigonomètriques	34
Fotografia 51: IAAPA.....	34
Fotografia 52: ASTM F24	35
Fotografia 53: Mobilitat del passatger.....	35
Fotografia 54: Tanques d'entrada a l'atracció.....	35
Fotografia 55: Forces G màximes segons l'eix de coordenades (x, y i z)	36
Fotografia 56: Discord logotip.....	37
Fotografia 57: NoLimits2 logotip.....	37
Fotografia 58: Disseny propi NL2	37
Fotografia 59: Excel logotip	38
Fotografia 60: Python logotip.....	38
Fotografia 61: PyCharm logotip	38
Fotografia 62: SolidWorks logotip.....	38
Fotografia 63: Cura logotip	39
Fotografia 64: Word logotip	39
Fotografia 65: Premiere Pro CC logotip.....	39
Fotografia 66: <i>Shambala</i>	40
Fotografia 67: <i>Steel Force</i>	41
Fotografia 68: <i>Nitro</i>	41
Fotografia 69: <i>Goliath</i>	41
Fotografia 70: <i>The Smiler</i>	41
Fotografia 71: Abella	41
Fotografia 72: Granota	41
Fotografia 73: Serp.....	41
Fotografia 74: Cartells de perill varis	42
Fotografia 75: Inserció de punts en NL2 per inici de disseny.....	43
Fotografia 76: Inserció de peralt en NL2 per inici de disseny.....	43
Fotografia 77: Dissenys experimentals.....	44
Fotografia 78: Dissenys experimentals.....	44
Fotografia 79: Simulació disseny experimental.....	44
Fotografia 80: Simulació del meu propi disseny vist en perfil.....	44
Fotografia 81: Simulació del meu propi disseny vist en planta.....	45
Fotografia 82: Simulació del meu propi disseny vist en 3D.....	45
Fotografia 83: Recorregut desplegat	45
Fotografia 84: Recorregut vist en planta.....	45
Fotografia 85: Recorregut vista en 3D.....	45
Fotografia 86: Propietats del recorregut	47
Fotografia 87: Vista 3D de la funció.....	56
Fotografia 88: Comparativa d'imatge amb nombre de punts elevat i baix.....	57
Fotografia 89: Disseny rails.....	66
Fotografia 90: Disseny i mides del patró d'un raíl.....	66
Fotografia 91: Encaix entre peces	67
Fotografia 92: Mides.....	68
Fotografia 93: Mides.....	68
Fotografia 94: Suport.....	69

Fotografia 95: Tub del suports	69
Fotografia 96: Pinça que enganxa raïl i suport	70
Fotografia 97: Piu que serveix per ajustar l'angle	70
Fotografia 98: Base del suport	70
Fotografia 99: Diferents punts de vista del primer disseny de les rodes	71
Fotografia 100: Error rodaments versió 1	71
Fotografia 101: Disseny d'internet	72
Fotografia 102: Rodaments versió 2.....	72
Fotografia 103: Rodaments	72
Fotografia 104: Disseny estampació 3D amb Cura	73
Fotografia 105: Impressió 3D	74
Fotografia 106: Realització dels forats	74
Fotografia 107: Col·locació de plantilla amb els forats del suports	74
Fotografia 108: Bases collades a la base	75
Fotografia 109: Unió de suports i peces	75
Fotografia 110: Muntatge dels tubs	75
Fotografia 111: Resultat final de la maqueta	76
Fotografia 112: Error i versió definitiva juntes.....	77
Fotografia 113: Comparació versió original i versió modificada	77
Fotografia 114: Comparació versió original i versió modificada.....	78
Fotografia 115: Radi de curvatura corba estació	78
Fotografia 116: Conjunt de la muntanya.....	81
Fotografia 117: Maqueta	81

6.2 Taules

Taula 1: Comparativa entre les muntanyes russes d'acer i de fusta	10
Taula 2: Alguns dels punts exportats de NL2	47
Taula 3: Taula dels pesos	49
Taula 4: Taula de les forces Normals pel pes 1	49
Taula 5: Distàncies entre punts	50
Taula 6: Forces de fregament del raïl amb les rodes pel pes 1	52
Taula 7: Energia potencial pel pes 1	52
Taula 8: Velocitat pel pes 1	54
Taula 9: Fregament amb l'aire pel pes 1	54
Taula 10: Posició temps	55
Taula 11: Velocitat	58
Taula 12: Acceleracions	58
Taula 13: Forces G	60
Taula 14: Velocitats màximes.....	63
Taula 15: Pas de metres a mil·límetres	67
Taula 16: Mides escalades.....	67
Taula 17: Escala escollida.....	68
Taula 18: Forces G calculades amb Excel	80

6.3 Gràfics

Gràfic 1: Velocitat en funció dels diversos pesos, mitjançant Excel.....	61
Gràfic 2: Velocitats, mitjançant Python.....	62
Gràfic 3: Pèrdua d'energia, mitjançant Excel	62
Gràfic 4: Energia mecànica, mitjançant Excel	63
Gràfic 5: Forces G errònies.....	64
Gràfic 6: Forces G verticals.....	65
Gràfic 7: Forces G lineals	65

6.4 Webgrafia

<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1jJA1fcDhNXIPkdU4GDOWYjRrpt5LialP>

Treball de recerca. “Eugeni Soler Forn, Newton en colors.” (Google Drive) [en línia]
Consultat el dia 5 d'abril del 2021 per entendre millor com són els treballs de recerca i com els estructura i realitza la gent.

<https://drive.google.com/file/d/142LgBQZFf23H6voRBr23EcyZpLtQj4l/view?usp=sharing>

Treball de recerca. “Francesc Tribaldo Lampreave, Projecte de la construcció i programació de la maqueta d'una casa domòtica.” (Google Drive) [en línia]
Consultat el dia 6 d'abril del 2021 per entendre millor com són els treballs de recerca i com els estructura i realitza la gent.

<http://www.institutpervives.cat/index.php?apartat=77>

Treball de recerca. (Institut Pere Vives Vich) [en línia]
Consultat el dia 6 d'abril del 2021 per llegir i descarregar tots els PDFs adjunts i poder llegir-los i extreure'n informació útil.

<https://www.coaster101.com/2017/12/04/matt-schmotzers-incredible-3d-printed-roller-coaster-model/>

<https://www.matterhackers.com/articles/3d-printed-working-roller-coaster-model>

Matt Schmotzer. (Coaster 101) [en línia]
Consultat el dia 15 d'abril del 2021 per informar-me de com construir la meua pròpia muntanya i per poder posar-me en contacte amb Matt Schmotzer i fer-li algunes preguntes.

<https://www.coaster101.com/2021/03/24/how-dan-fritsche-designed-and-built-a-3d-printed-launch-coaster/>

<https://www.coaster101.com/tag/engineer/>

Dan Fritsche. (Coaster 101) [en línia]
Consultat el dia 15 d'abril del 2021 per informar-me de com construir la meua pròpia muntanya i per poder posar-me en contacte amb Dan Fritsche i fer-li algunes preguntes.

https://nolimitscoaster.com/index.php/resources#resources_tutorials

NoLimits2 resources and videos (NoLimits2) [en línia]
Consultat el dia 23 de juny del 2021 per dibuixar una muntanya russa.

<https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/uncategorized/vea-la-montana-rusa-funcional-impresa-en-3d-en-solidworks-world-2019/>

Vea la montaña rusa funcional impresa en 3D en SOLIDWORKS World 2019 (SolidWorks) [en línia]
Consultat el dia 26 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.matterhackers.com/articles/3d-printed-working-roller-coaster-mode>

3D Printed Working Roller Coaster Model (MatterHackers) [en línia]
Consultat el dia 28 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://science.howstuffworks.com/engineering/structural/roller-coaster1.htm>

How Roller Coasters Work (Howstuffworks) [en línia]
Consultat el dia 03 d'agost del 2021 per buscar informació sobre la història.

<https://www.britannica.com/topic/roller-coaster>

roller coaster (Britannica) [en línia]
Consultat el dia 05 d'agost del 2021 per buscar informació sobre la història.

https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_roller_coaster

History of the roller coaster (Wikipedia) [en línia]
Consultat el dia 10 d'agost del 2021 per buscar informació sobre la història.

https://en.wikipedia.org/wiki/Roller_coaster#History

Roller Coaster (Wikipedia) [en línia]
Consultat el dia 12 d'agost del 2021 per buscar informació sobre la història.

https://en.wikipedia.org/wiki/Wooden_roller_coaster#Wooden_versus_steel

Wooden roller coaster (Wikipedia) [en línia]
Consultat el dia 14 d'agost del 2021 per buscar informació sobre els materials.

<https://shaniabooks.blogspot.com/2020/02/coasters-101-pdf-download.html>

Shania Books Library (Blogspot) [en línia]
Consultat el dia 14 d'agost del 2021 per buscar informació sobre els materials.

https://rollercoaster.fandom.com/wiki/Track#Box_Track

Track (Coasterpedia) [en línia]
Consultat el dia 14 d'agost del 2021 per buscar informació sobre els rails d'acer.

https://en.wikipedia.org/wiki/Steel_roller_coaster

Steel roller coaster (Wikipedia) [en línia]
Consultat el dia 14 d'agost del 2021 per buscar informació sobre els materials.

<https://blocs.xtec.cat/laterraalvilot/la-gravetat/>

Gravetat (Xtec) [en línia]
Consultat el dia 15 d'agost del 2021 per buscar informació sobre la força de la gravetat.

https://ca.wikipedia.org/wiki/Gravetat#Variaci%C3%B3_de_la_gravetat_a_la_Terra

Gravetat (Wikipedia) [en línia]
Consultat el dia 16 d'agost del 2021 per buscar informació sobre la força de la gravetat.

http://cesire.cat/mialias.net/recursos/context/fisica/unitat%203/214_la_conservaci_de_l_energia_mecnica.html

La conservació de l'energia mecànica (Física de batxillerat) [en línia]
Consultat el dia 16 d'agost del 2021 per buscar informació sobre les energies.

<http://www.xtec.cat/~rdavila/fisica1rbat/resumunitat6.pdf>

Conservació de l'energia (Xtec) [en línia]

Consultat el dia 16 d'agost del 2021 per buscar informació sobre les energies.

<https://respuestas.me/q/por-que-el-negro-y-el-amarillo-indican-peligro-34067337215>

¿Por qué el negro y el amarillo indican peligro? (RespuestasAquí) [en línia]

Consultat el dia 7 de setembre del 2021 per buscar informació sobre els colors i les espècies.

<http://www.naturalezacantabrica.es/2015/12/el-lenguaje-de-los-colores-codigo.html>

El lenguaje de los colores: código universal de alarma (Naturaleza Cantábrica) [en línia]

Consultat el dia 7 de setembre del 2021 per buscar informació sobre els colors i les espècies.

<https://www.rockymtnconstruction.com/>

Rocky Mountain Construction (Rocky Mountain Construction) [en línia]

Consultat el dia 23 de desembre del 2021 per buscar informació sobre els diferents raïls.

<http://www.psuthemeparkengineering.com/what-we-know/electromagnetic-propulsion-of-roller-coasters>

Electromagnetic Propulsion of Roller Coasters (TPEG Knowledge Database) [en línia]

Consultat el dia 02 de gener del 2022 per buscar informació sobre les plaques electromagnètiques.

https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Elementos_de_una_monta%C3%B1a_rusa

Elementos de una montaña rusa (Wikipedia) [en línia]

Consultat el dia 03 de gener del 2022 per buscar informació sobre els sistemes de frens.

<http://fiscatraccion.weebly.com/sistemas-de-frenado.html>

Elementos de una montaña rusa (Wikipedia) [en línia]

Consultat el dia 03 de gener del 2022 per buscar informació sobre els sistemes de frens.

<http://acolap.org.co/wp-content/uploads/2015/05/ACOLAP-2015.pdf>

PowerPoint F24 (Acolap) [en línia]

Consultat el dia 05 de gener del 2022 per buscar informació sobre l'F24.

<https://www.iaapa.org/>

IAAPA (IAAPA) [en línia]

Consultat el dia 05 de gener del 2022 per buscar informació sobre la IAAPA.

https://en.wikipedia.org/wiki/International_Association_of_Amusement_Parks_and_Attractions

IAAPA (Wikipedia) [en línia]

Consultat el dia 05 de gener del 2022 per buscar informació sobre la IAAPA.

<https://matplotlib.org/stable/tutorials/colors/colormaps.html>

https://matplotlib.org/stable/gallery/color/named_colors.html

Color gallery (Matplotlib) [en línia]

Consultat el dia 15 de gener del 2022 per escollir els colors del gràfics de Python.

6.5 Vídeos

<https://www.youtube.com/watch?v=Ji5Oak9kTlc>

Documental National Geographic sobre el Boomerang Invertit. “¿Cómo se construye una montaña rusa? (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 21 i 24 de gener del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=C3yynxxM3JM&t=194s>

<https://www.youtube.com/watch?v=6SRtu3HJ7PM>

<https://www.youtube.com/watch?v=a4KGxotvv4k>

Construcció i explicació de la muntanya que he elaborat. (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 17 d'abril del 2021 per veure com elabora la seva muntanya

<https://www.youtube.com/watch?v=uJ51T13IsHM>

Documental National Geographic Megastructures - World Fastest Rollercoaster (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 17 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=UBxJQUZKsRM>

Documental National Geographic Megastructures - Ultimate Rollercoaster (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 19 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=CmrCqEdwn7I>

Problematic Roller Coasters - Kingda Ka Review & Technical Analysis (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 21 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

https://www.youtube.com/watch?v=X7_9ugKYBHw

Fury 325 at Carowinds Documentary (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 22 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=P8rJmWlnfHs>

Mega Structure: Building the biggest roller coasters - Classic Documentary (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 23 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=soldERfpA4I&list=PLNu70CaUTZGACZjntXAV1V3zhHX5YU-y9&inde=3>

Adrenaline Rush: Extreme Rides 2 - Classic Documentary (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 23 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=j5Ycu4hrKIQ&t=1276s>

NoLimits2 resources and videos (NoLimits2) [en línia]

Consultat el dia 23 de juny del 2021 per dibuixar una muntanya russa.

<https://www.youtube.com/watch?v=l2A9RaRbtLY&list=PLNu70CaUTZGACZjntXAV1V3zhHX5YU-y9&index=3>

Dangerous Courves: Extreme Rides 1 - Classic Documentary (YouTube) [en línia]

Consultat el dia 25 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=U4EP1V-G9-Y>

Vea la montaña rusa funcional impresa en 3D en SOLIDWORKS World 2019 (SolidWorks) [en línia]

Consultat el dia 26 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=s1DxZgkvbsA>

3D Printed Launch Roller Coaster (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 28 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=C3yynxxM3JM>

Coaster 101 - Invertigo Overview / Workshop (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 28 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=uPRtrp9P0O0>

3D Printed B&M Inspired Inverted Roller Coaster Train (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 28 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=ryw7auV18Ro>

B&M Track design mistakes (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 28 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

<https://www.youtube.com/watch?v=k5Yl2YjKbn0>

Loch Ness Looper - 1/24th Scale Model Roller Coaster (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 28 de juny del 2021 per familiaritzar-me amb el tema escollit.

https://nolimitscoaster.com/index.php/resources#resources_tutorials

<https://www.youtube.com/watch?v=nQlub4wV9Fk&t=1s>

https://www.youtube.com/watch?v=3QA78qY_euY

https://www.youtube.com/watch?v=8UwLmGtXYQo&list=PL7EKfB0I_zAUD2vimq4dqt2UPxGhtsTnn&index=6

<https://www.youtube.com/watch?v=180L2jF->

[1x4&list=PL7EKfB0I_zAUD2vimq4dqt2UPxGhtsTnn&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=180L2jF-1x4&list=PL7EKfB0I_zAUD2vimq4dqt2UPxGhtsTnn&index=7)

<https://www.youtube.com/watch?v=7Y->

[T0fXRxME&list=PL7EKfB0I_zAUD2vimq4dqt2UPxGhtsTnn&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=7Y-T0fXRxME&list=PL7EKfB0I_zAUD2vimq4dqt2UPxGhtsTnn&index=7)

<https://www.youtube.com/watch?v=8Uz9ajB1e8U>

<https://www.youtube.com/watch?v=CUQtphFGNg>

Consultat entre el dia 6 i 16 de juliol del 2021 per aprendre a fer servir NoLimits2

<https://www.youtube.com/watch?v=oFsLdM7miUc>

Roller Coaster Restraints: Explained (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre els seients.

<https://www.youtube.com/watch?v=J8pJiV44hVM>

The Physics of Roller Coasters (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre els diferents sistemes de frenada i de tracció (inici).

<https://www.youtube.com/watch?v=BunU6CTmhFw>

How rollercoasters affect your body (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre les forces G, entre d'altres.

<https://www.youtube.com/watch?v=oetVvR5RQUs>

Why is being scared so fun? (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre les emocions que sentim quan pugem a una muntanya russa.

<https://www.youtube.com/watch?v=0JMIWMiObrw>

Roller Coaster Safety: Explained (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre els mètodes de seguretat que tenen les muntanyes russes

https://www.youtube.com/watch?v=mfk_8SDAOTM

Roller Coaster Sounds: Explained (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre els sorolls que es produeixen en una muntanya.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZKJX7oGpi8g>

Roller Coaster Elements: Explained (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre les diferents formes que pot prendre una muntanya russa.

<https://www.youtube.com/watch?v=P8JTKmsy1SQ>

The End of World Breaking Roller Coasters? (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 16 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre records i visualització de la barreja de colors!

<https://www.youtube.com/watch?v=f8Mm4E5riDc>

Why Roller Coasters Click (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 19 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre sistemes antiretròcés.

<https://www.youtube.com/watch?v=TjE4SKpN8y4>

How Top Thrill Dragster Works (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 19 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre sistemes hidràulics i alguns càlculs.

<https://www.youtube.com/watch?v=Hqv68CWJlv0>

Roller Coasters: Wood VS Steel (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 19 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre sistemes hidràulics i alguns càlculs.

<https://www.youtube.com/watch?v=digOQme9aFU>

What's the Best Seat on a Roller Coaster? (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 19 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre com varien les forces que "pateixes" segons a la fila que t'asseguis.

https://www.youtube.com/watch?v=6AzHwNLxI_4

Roller Coaster Forces: Explained (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 19 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre les forces que actuen en una muntanya russa.

https://www.youtube.com/watch?v=JQqjV_4IKgg

An Introduction to Roller Coasters (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 20 de juliol del 2021. Informació molt útil per un possible inici

<https://www.youtube.com/watch?v=nLP1z6-nhZw>

A Brief History of Roller Coasters (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 20 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre la història.

<https://www.youtube.com/watch?v=jMsF4juzQ-4>

The amazing engineering behind roller coasters (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 20 de juliol del 2021. Informació molt general.

https://www.youtube.com/watch?v=jSyz_U79iQ0

How Roller Coasters Use Energy (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 20 de juliol del 2021. Informació molt general.

<https://www.youtube.com/watch?v=pC3jvXQHwUg>

<https://www.youtube.com/watch?v=hRcCWRSgOEg>

<https://www.youtube.com/watch?v=3Km9Hss4Zrk>

https://www.youtube.com/watch?v=B_b47RwqWDY

Physics of Roller Coasters using NL2 Simulation SW - Catastrophic Physics Coaster (parts 1, 2, 3 i 4) (Youtube) [en línia]
Consultat el dia 20 de juliol del 2021. Informació molt útil per aprendre fórmules i com realitzar càlculs.

<https://www.youtube.com/watch?v=i28eHWujClw>

The POWER of coaster names (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 27 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre el nom que hauria de tenir una muntanya russa.

<https://www.youtube.com/watch?v=Qx4RnlsXAV0>

Why Roller Coaster track is Filled with Sand (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 27 de juliol del 2021. Informació molt útil sobre el soroll.

<https://www.youtube.com/watch?v=m2s22tgRCIM>

The Physics of Rollercoasters (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 27 de juliol del 2021. Parla sobre un nou concepte molt interessant, els “hypnic jerks”.

<https://www.youtube.com/watch?v=NkeLFtFD8BM>

The Physics of a Roller Coaster loop (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 27 de juliol del 2021.

https://www.youtube.com/watch?v=upjl5dw8_Es

<https://www.youtube.com/watch?v=s3ArtJYXscg>

<https://www.youtube.com/watch?v=O6NDROn2WIE&t=1s>

<https://www.youtube.com/watch?v=6QcbngODHiM>

<https://www.youtube.com/watch?v=z7M5sRjoPHU>

<https://www.youtube.com/watch?v=h53Vu3BefaQ>

Matt Anderson (Youtube) [en línia]

Consultat els dies 27 i 28 de juliol del 2021. Han servit de molta ajuda per realitzar els càlculs i les comprovacions.

https://www.youtube.com/watch?v=zCKeniklH_c

“Our World: Potential and Kinetic Energy” by Adventure Academy (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 28 de juliol del 2021.

<https://www.youtube.com/watch?v=Sa5k5cvEJpc>

Engineer Explains Every Roller Coaster for Every Thrill (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 29 de juliol del 2021. Explicació molt detallada dels diferents estils de muntanyes i les seves diferències.

<https://www.youtube.com/watch?v=clvSvVlxMuE>

Why roller coaster loops aren't circular (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 29 de juliol del 2021. Introducció molt útil.

<https://www.youtube.com/watch?v=uoyWq3Qb-0A>

<https://www.youtube.com/watch?v=RhX5pVN29GI>

All New For 2022 Roller Coasters: Explainex USA i The Future of Roller Coasters (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 23 de desembre del 2021. Futur de les muntanyes russes.

<https://www.youtube.com/watch?v=b81qXvFLdrk>

The History of launched Roller Coasters (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 01 de gener del 2022. Llançaments.

<https://www.youtube.com/watch?v=P8JTKmsy1SQ>

The end of World Breaking Roller Coasters? (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 01 de gener del 2022. Rècords.

<https://www.youtube.com/watch?v=VollkTkYqMw>

Scatter plot as third variable as color (Youtube) [en línia]

Consultat el dia 15 de gener del 2022. Pintar gràfiques Python.