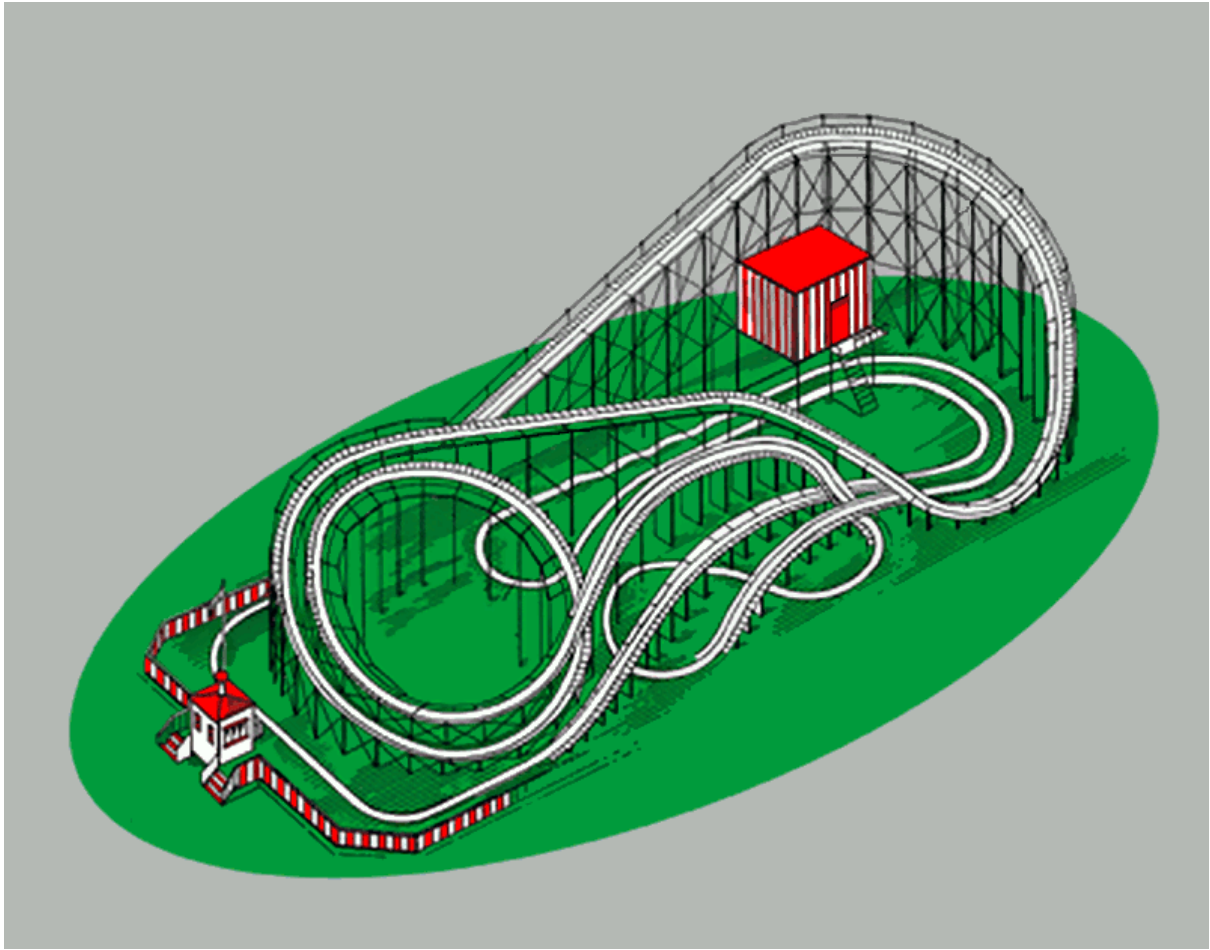




Construcció d'una muntanya russa amb impressió 3D

Pseudònim: DioYoku

“Nothing happens until something moves.”

Albert Einstein

Abstract

This research project develops the process necessary for creating a model of a marble run that aims to mimic the physics of a roller coaster with elements of a real mountain, such as a vertical loop.

First, research was conducted on the history and origin of roller coasters, their classification by type, and their general description. Along with this, the current international landscape was contextualised.

Furthermore, roller coasters were studied from a more technical and physical perspective. The fundamental law of physics that governs their operation, Newton's laws, was explained after identifying the main elements that comprise them.

Next, research was conducted on marble circuits, exploring their usefulness, classification and, most importantly, their physical relationship with roller coasters.

Finally, with all the knowledge gained from the previous research, a series of 3D prototypes were created, which led to the creation of a final model that includes a vertical loop, a double horizontal loop and a mechanical climb with chains.

Resumen

En este trabajo de investigación se desarrolla el proceso necesario para la creación de una maqueta de un circuito de canicas que pretende imitar las físicas de una montaña rusa con elementos de una montaña real como el loop vertical.

En primer lugar, se ha realizado una investigación sobre la historia y el origen de las montañas rusas, la clasificación de tipos y su descripción general. Junto con esto, se ha contextualizado el panorama actual internacionalmente.

Por otra parte, se han estudiado las montañas rusas desde una perspectiva más técnica y física. Se ha explicado la ley fundamental de la física que rige su funcionamiento, las leyes de Newton después de haber identificado los principales elementos que las conforman.

Seguidamente, se ha hecho una investigación sobre los circuitos de canicas divagando entre su utilidad, clasificación y lo más importante, su relación física con las montañas rusas.

Finalmente, con todo el conocimiento obtenido con la investigación previa, se ha ido creando una serie de prototipos en 3D que fueron dando paso a la creación de un modelo final que incluye un loop vertical, un loop horizontal doble y una subida mecánica con cadenas.

Resum

En aquest treball de recerca es desenvolupa el procés necessari per a la creació d'una maqueta d'un circuit de bales que pretén imitar les físiques d'una muntanya russa amb elements d'una muntanya real com el loop vertical.

En primer lloc, s'ha realitzat una recerca sobre la història i l'origen de les muntanyes russes, la classificació de tipus i la seva descripció general. Juntament amb això, s'ha contextualitzat el panorama actual internacionalment.

D'altra banda, s'han estudiat les muntanyes russes des d'una perspectiva més tècnica i física. S'ha explicat la llei fonamental de la física que regeix el seu funcionament, les lleis de Newton després d'haver identificat els principals elements que les conformen.

Seguidament, s'ha fet una recerca sobre els circuits de bales divagant entre la seva utilitat, classificació i el més important, la seva relació física amb les muntanyes russes.

Finalment, amb tot el coneixement obtingut amb la recerca prèvia, s'ha anat creant una sèrie de prototips en 3D que van anar donant pas a la creació d'un model final que inclou un loop vertical, un loop horitzontal doble i una pujada mecànica amb cadenes.

Índex

1.Introducció.....	1
2.Hipòtesi, objectius i metodologia.....	2
3. Conceptes bàsics.....	3
3.1 Que es una muntanya russa?.....	3
3.2 Tipus de muntanyes russes.....	4
3.2.1 Les muntanyes russes d'acer.....	4
3.2.2 Les muntanyes russes de fusta.....	5
4 Història i origen.....	6
4.1 Inici, Rússia.....	6
4.2 França.....	7
4.3 Estats units.....	9
4.4 Muntanyes més destacables de l'actualitat.....	11
4.4.1 Formula Rossa.....	11
4.4.2 Steel Vengeance.....	12
4.4.3 The Smiler.....	12
4.4.4 Takashiba (高飛車).....	13
5 Components.....	14
5.1 Estació.....	14
5.2 Sistema de llançament i mecanismes d'elevació.....	15
5.2.1 Rollback.....	18
5.3 Vagó i tren.....	19
5.3.1 Les rodes.....	19
5.3.2 La configuració dels seients.....	20
5.4 Frens.....	23
5.5 Fonaments i suports.....	24
6. Funcionament.....	25
6.1 Les lleis de Newton.....	25
6.2 La llei de la conservació de l'energia.....	26
7. Els circuits de bales.....	28
7.1 Què és un circuit de bales?.....	28
7.2 Tipus de circuits de bales.....	30
7.3 Física dels circuits de bales.....	31
8. Part pràctica.....	32
8.1 Sketchup i model 0.....	32
8.2 Programa 3D.....	33
8.3 Prototip 1.....	34
8.4 Prototip 2.....	37
8.5 Prototip Final.....	42
8.5.1 Càlculs.....	42
8.5.1.1 Loop inicial.....	42
8.5.1.2 Energies al loop inicial.....	43
8.5.1.3 Pujada parcial.....	44

8.5.2 Disseny.....	45
8.5.2.1 Loop vertical.....	46
8.5.2.2 Corbes de transició.....	48
8.5.2.3 Doble loop horitzontal.....	49
8.5.2.4 Pujada final mecànica.....	51
9. Conclusions.....	53
10. Fonts.....	54
11.1 Bibliografia.....	54
12.1 Webgrafia.....	54
13. Agraïments.....	58

1.Introducció

Per arribar a triar el tema que tractaré en aquest TR m'he basat en diferents aspectes com els meus interessos o la viabilitat d'una part pràctica. Sabia que volia fer-lo d'algun tema relacionat amb la tecnologia com els videojocs o la robòtica però després de reflexionar molt en aquestes possibilitats, vaig decidir que quedarien descartades perquè no tenia una idea sòlida de que investigar o com fer-ho.

Basant-me en el fet que em fascinen els objectes cinètics que es mouen amb fluïdesa com els trens de joguina que o el pen spinning vaig arribar al tema que tractaré en aquest treball de recerca: els circuits de bales i les muntanyes russes. Concretament enfocat als circuits de bales ja que compleix totes aquestes condicions. Em vaig convencer definitivament quan el meu professor de tecnologia va imprimir un model 3D d'un circuit de bales motoritzat i vaig quedar fascinat amb el moviment automàtic de les bales.

Donat que els circuits que havia vist no hi contenien elements propis de les muntanyes russes com els loops, vaig plantejar l'objectiu final del treball aconseguir fer un model amb aquestes característiques i altres requisits com la motorització a l'hora de pujar, un gran tamany o que es divideix en diferents vies amb diferents recorreguts que, d'una manera o d'altre convergeixen en el mateix punt de partida.

Això representa la idea que tinc de part pràctica i final del meu treball pero per arribar a aquest punt haig de passar per la part teorica on hauré d'investigar més sobre les muntanyes russes tenint en compte que són la inspiració principal dels circuits de bales. Amb aquest coneixement i l'ajuda d'eines com Sketchup o AutoCAD faré el meu disseny.

2.Hipòtesi, objectius i metodologia

Com a hipòtesi, vull plantejar el dubte de si el moviment d'una muntanya russa com El Shambala del parc temàtic català PortAventura World o L'atracció d'acer: SUPERMAN del parc Wagner situat a Madrid pot ser replicat a una escala petita en un circuit de bales. La pregunta concreta que actuarà com objectiu final d'aquest treball de recerca és: Es pot replicar una muntanya russa amb loops i drops a una escala en miniatura i que sigui funcional com pot ser un circuit de bales?

Vull, abans de començar la recerca, donar el meu punt de vista perquè al moment de fer la conclusió, pugui tornar a aquesta primera hipòtesi per comparar-les. Sense saber res, crec que pot ser difícil però possible basant-me en el model que va imprimir el meu professor de tecnologia Jaime Morcillo.

Donat que faig batxillerat, crec que serà possible realitzar el projecte, ja que puc demanar ajuda a diferents professors de diverses matèries; d'aquesta manera, no serà un gran problema fer els càlculs per al model. No obstant això, crear aquest projecte també comporta haver d'aprendre noves tècniques i utilitzar aplicacions que no he estudiat a classe.

Els objectius que es volen assolir amb aquest treball és principalment respondre la hipòtesi i poder arribar als objectius que comporta a part de la maqueta final: les físiques que actuen a dins del circuit, el funcionament d'una impressora 3D o els programes que es fan servir o el disseny del circuit i les seves parts. Paral·lelament, també vull estudiar la història de les muntanyes russes, aplicacions que tenen a part de les atraccions en els parcs temàtics i la seva relació amb els circuits de bales.

La metodologia que faré servir serà investigar principalment a la xarxa mirant videos i pàgines web, però si es possible buscar informació de gent experta i aniré a biblioteques amb l'objectiu de trobar llibres rellevants al tema tractat. Finalment per comprobar el coneixement après ho posaré a la pràctica i crearé un disseny propi de circuit de bales.

3. Conceptes bàsics

3.1 Que es una muntanya russa?

Les muntanyes russes són atraccions dissenyades per desplaçar un conjunt de vagons coneguts com tren per un circuit amb rails que pot mostrar pujades, baixades, loopings entre altres elements de manera segura. Això ho aconsegueix mitjançant el lliscament de les rodes amb la via i l'ajuda de components de pujada i baixada com un cable connectat per un motor o la mateixa gravetat.

N'hi ha infinitat de possibles variacions amb diferents velocitats, recorreguts, elements, etc però es troben generalment en parcs temàtics i d'atraccions com PortAventura World situat a Tarragona o el Parc Wagner situat a Madrid. No obstant, es poden trobar altres models més petits a fires ambulants presents en festes de barri.



Imatge 1: Parc Wagner en Madrid. Imatge extreta de: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parque-warner.jpg>

3.2 Tipus de muntanyes russes

No hi ha una classificació oficial de les muntanyes russes i per tant la divisió d'aquestes en grups es torna criteri de l'individu. Avui dia, la forma més comuna és classificar segons el material que formen les vies però com ja he explicat, existeixen altres formes com segons el sistema de llançament, el disseny, el recorregut i la posició del passatger.

Si classifiquem segons el material de les vies podem trobar principalment 2 tipus: fusta i acer, tot i que existeixen les muntanyes híbrides. Aquests dos materials tenen el seus beneficis e inconvenients que explicaré en els apartats següents.

3.2.1 Les muntanyes russes d'acer

Gràcies a la resistència de l'acer, aquestes no necessiten grans suports. Per aquesta raó les muntanyes russes d'acer destaquen per la quantitat d'elements complexos com inversions, baixades a gran velocitat o corbes molt pronunciades. En comparació a les muntanyes de fusta, les d'acer tenen un cost molt més elevat sumat al complex disseny d'aquestes que creen pressupostos gegants que poden arribar fins a 40 o 50 milions d'euros.

Actualment, aquestes són les que predominen al món tot i que la majoria tenen restriccions normalment d'alçada per gaudir-ne amb seguretat. Un exemple el podem trobar a PortAventura Park, amb l'atracció coneguda com a Dragon Khan que exigeix un mínim de 140 cm amb un màxim de 195 cm per pujar a l'atracció. Aquesta va ser inaugurada l'any 1995 i destaca principalment per les 8 inversions que té a més de la baixada inicial de 45 metres. Pot arribar fins als 110 km/h i sense cap dubte és una de les muntanyes d'acer més icòniques d'Espanya.



Imatge 2: Atracció Dragon Khan ubicat en PortAventura.

Imatge extreta de: <https://commons.wikimedia.org/>

3.2.2 Les muntanyes russes de fusta

Són també conegudes com els woodie i es caracteritzen per tenir estructures més senzilles que les d'acer a causa dels límits tant de flexibilitat com de resistència de la fusta. Aquests tipus de muntanya va ser molt famosa durant el segle XX, però cada vegada ha quedat més marginat pels d'acer. A més, avui dia aquestes no són completament de fusta sinó que les vies d'aquestes portant un forrament d'acer en la part superior de la via i fins i tot, poden tenir acer en els perfils de l'estructura.

Tot i que les estructures són més senzilles, la fusta provoca certa por psicològica a causa de les vibracions i els cruixits que portant els usuaris a experimentar més emoció durant els recorreguts. D'altra banda, la fusta té un cost més econòmic que l'acer, però pel material, aquestes atraccions necessiten manteniments i revisions constants.

Un gran exemple de muntanya russa de fusta és la famosa atracció Cyclone ubicat en Luna Park, Nova York, Estats Units que va obrir les portes l'any 1927 i continua oberta avui dia. Consta de 800 m de llargada que comença amb una gran baixada de 26 metres que dona pas a una successió de pujades, caigudes i corbes tancades que mantenen la intensitat fins a tornar a l'estació. Com és típic dels woodies, aquesta atracció no té cap inversió.



Imatge 3: Atracció Cyclone ubicat en Luna Park.

Imatge extreta de: <https://en.wikipedia.org/wiki/>

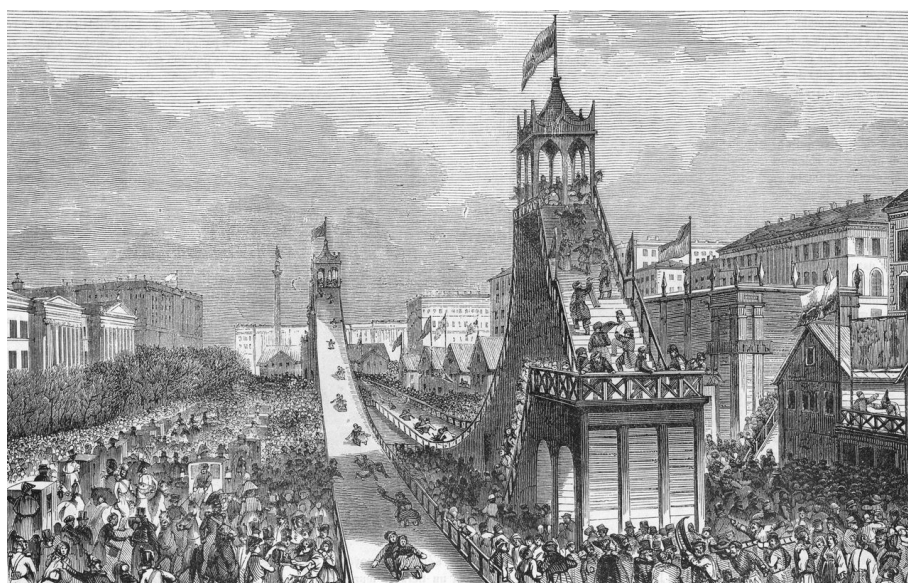
4 Història i origen

4.1 Inici, Rússia

Ens remuntem als segles XVII-XVIII, a la Rússia hivernal on, sense cap mena de raïls o frens, els russos van inventar unes estructures fetes de fusta que, aprofitant el lliscament que generaven el gel i la neu amb els trineus de fusta que feien servir. Aquests tobogans gegants podien arribar fins als 25 m d'alçada i angles de 50° allargant-se amb diferents turons de menor grandària pèl llarg del recorregut.

Va ser especialment popular a Sant Petersburg, tant, que va arribar a l'emperadriu Catalina II que va contribuir a la creació de més atraccions i fins i tot va construir algunes en el seu jardí.

Irònicament, els russos coneixien aquests espais d'oci com “muntanyes americanes” o en rus “Amyerikánskiye gorky” tot i que després quan es van expandir per la resta d'Europa es van començar a anomenar “muntanyes russes” en diferents idiomes com el català, el castellà o el francès atès el seu origen geogràfic.



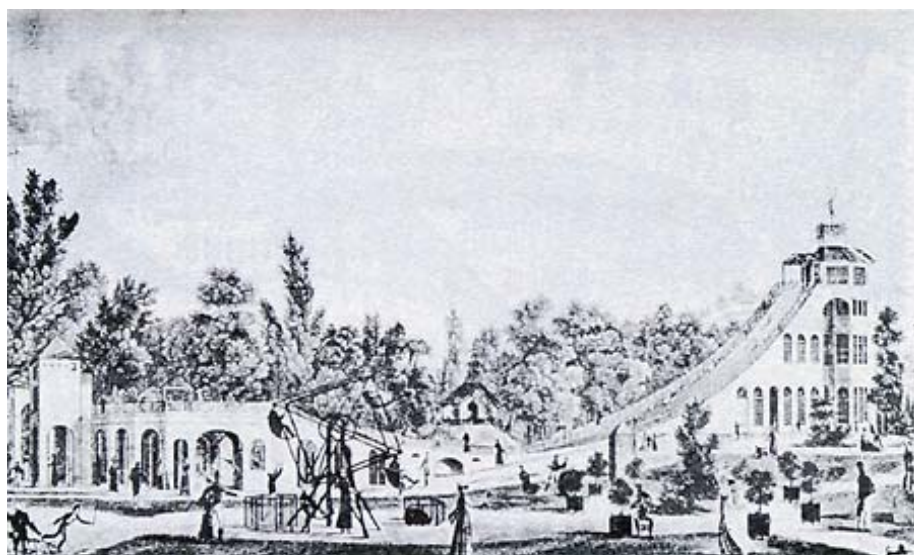
Imatge 4: Primeres estructures russes de fusta del segle SV.XVIII . Imatge extreta de: <https://www.atlasobscura.com/articles/russian-roller-coasters>

4.2 França

Durant les guerres napoleòniques del segle XIX on van lluitar França i Rússia, la idea dels tobogans gegants va arribar finalment a París, on els empresaris van començar a implementar raïls i vagons que prèviament es trobaven en desús a la idea russa.

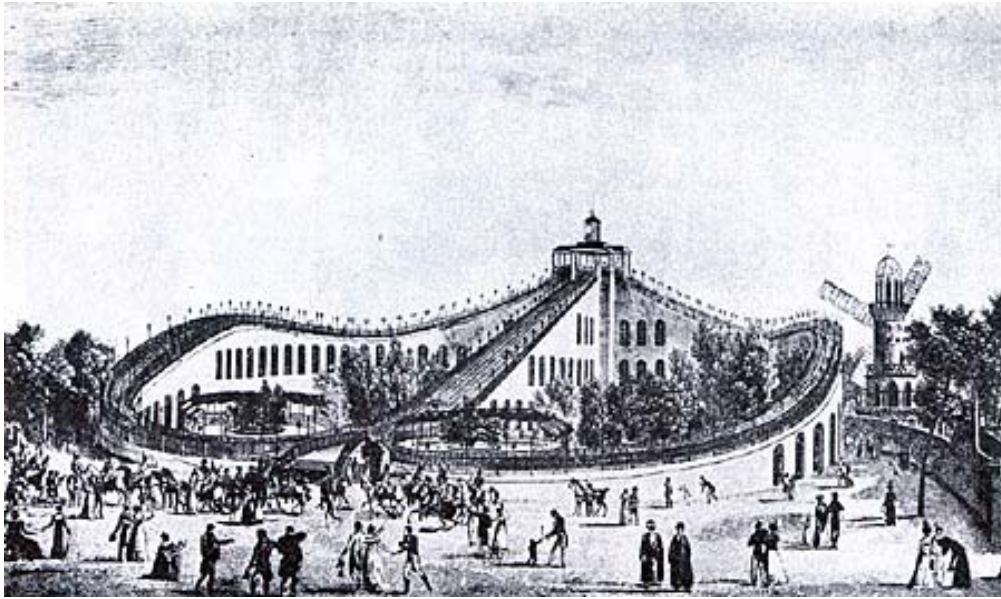
Els primers dissenys de muntanya russa construïda amb rodes i raïls van ser inaugurades en 1817, a París. Són conegudes com “Les Montagues Russes a Belleville” i “Promenades Aeriennes” o en català, “Les Muntanyes Russes de Belleville” i “Passeig Aeri”.

Aquests models ja començaven a mostrar característiques pròpies d’una muntanya russa. Per exemple, “Les Montagues Russes a Belleville” estava format per una estructura de fusta i presentava un sistema de seguretat on els eixos dels vagons s’encaixaven amb uns forats situats a la via, evitant els moviments indesitjats que genera la vibració i la velocitat.



Imatge 5: Les Montagues Russes a Belleville . Imatge extreta de: <https://www.ultimaterollercoaster.com>

D’altre banda “Promenades Aeriennes” (The Aerial Walk) tenia una forma de cor, amb dues vies que circulaven en direccions oposades des d’una torre central on s’embarcaven. Durant el trajecte, el vagó de tres rodes podia arribar a assolir els 60 km/h a la baixada.



Imatge 6 :Promenades Aeriennes. Imatge extreta de:
<https://www.ultimaterollercoaster.com/coasters/history/start/begin3.shtml>

L'any 1846 se'n va provar el primer bucle al Jardí Frascati, situat a París. Aquest va ser construït i importat des d'Anglaterra i va rebre el nom de “Chemin centrífug”. Es tractava d'una inversió de



French Centrifugal Railway - 1815

Imatge 7: Chemin centrífug . Imatge extreta de:
<https://www.ultimaterollercoaster.com/coasters/history/start/begin4.shtml>

360° totalment circular amb 13 peus de diàmetre (4 metres). Va ser inspirat en una versió anglesa més petita de 6,5 peus (2 metres) i cap de totes dues van arribar a ser gaire populars.

4.3 Estats units

L'any 1884, la primera muntanya russa moderna va ser declarada oberta al públic en Coney Island, Nova York. Va ser prèviament dissenyada per LaMarcus Adna Thompson 3 anys abans de la seva inauguració inspirat en un tren d'extracció de carbó que transportava passatgers en 1827. Aquesta es considera la primera muntanya russa del món, ja que va ser el primer model capaç d'operar de manera continua transportant molts passatgers i de forma segura transformant la indústria en un model de negoci per a parcs de diversió. A la dècada de 1900 va començar a operar Loop the Loop, una muntanya russa d'acer ubicat en Coney Island, Nova York i dissenyada per Edward Green, que va implementar un loop amb forma de llàgrima invertida, reduint les forces G que patien els passatgers en la muntanya Flip Flap Railway ubicat en el mateix parc però inaugurada l'any 1895. Al contrari de Loop the Loop, Flip Flap Railway era totalment circular i els passatgers podien arribar fins als 12 forces G quan el límit adequat per una muntanya russa actual hauria de ser de menys de 6 forces G per evitar els desmaigs que es generen per falta de sang en el cervell.



Imatge 8: Loop The Loop . Imatge extreta de: https://en.wikipedia.org/wiki/Loop_the_Loop

Cap d'aquestes van estar disponibles més de deu anys a causa de la baixa rendibilitat donat que estàvem dissenyades per portar només 1 vagó amb 4 passatgers cada 5 minuts a part evident perill i les molèsties que experimentaven els usuaris.

Tanmateix, un gran avanç es va donar l'any 1959 amb l'atracció Matterhorn Bobsleds, ubicat a Disneyland Park, California, Estats Units. Consisteix en un viatge curt sense massa velocitat per l'interior d'una muntanya fabricada ambientada en la muntanya original Matterhorn ubicat en els Alps. A més, tot i que la muntanya era de mentida, Disneyland va contractar a escaladors professionals per escalar la muntanya i saludar a la gent com a part de la diversió.



Imatge 9: Matterhorn Bobsleds . Imatge extreta de:
<https://commons.wikimedia.org/wiki>

Tot i que no destaca per la velocitat ni pels elements tècnics, va ser la que va començar a fer servir l'acer tubular, un material que es pot doblegar amb facilitat i que va permetre dissenyar recorreguts molt més complexos i amb inversions segures. Gràcies a aquest avenç, les muntanyes russes van deixar enrere les limitacions estructurals de la fusta i es van començar a dissenyar muntanyes cada vegada més altes, més ràpides i amb elements espectaculars com loops i tirabuixons.

Un exemple el podem trobar l'any 1976, que surt a la llum l'atracció The New Revolution ubicat en el parc temàtic Six Flags Magic Mountain, Califòrnia, Estats Units. Aquesta muntanya va ser dissenyada per Werner Stengel i destaca pel seu innovador looping vertical amb forma de clotoide que va reduir considerablement les forces G d'antics dissenys passant de 12 a 4,9 forces G. Gràcies a l'acer tubular, aquest loop arribava als 34 metres d'alçada i era capaç de portar 5 vagons a l'hora amb un total de 20 passatgers.



Imatge 10: Loop més icònic de l'atracció Six Flag Mountain . Imatge extreta de: <https://en.wikipedia.org>

4.4 Muntanyes més destacables de l'actualitat

Des de l'aparició de l'acer tubular, les muntanyes russes han millorat en alçada, velocitat i control en la marxa. Els nous sistemes de llançament magnètic permeten acceleracions més ràpides i inversions precises. A part d'això, la tematització i la tecnologia han convertit l'experiència de les muntanyes russes en atraccions molt més completes i immersives. Per exemple aquests són algunes de les muntanyes que més destaquen en l'actualitat:

4.4.1 Formula Rossa

Ubicat en el parc d'atraccions Ferrari World, Emirats Àrabs Units és coneguda pel títol de la muntanya russa més ràpida del món. És capaç d'assolir els 240 km/h en només 5 segons gràcies al sistema hidràulic de llançament. Aquesta muntanya té un disseny inspirat en els cotxes de Ferrari

Fórmula 1 i per culpa de la gran velocitat, els passatgers han de portar ulleres especials per protegir-se de les partícules de l'aire.

4.4.2 Steel Vengeance

Es troba a Cedar Point, en l'estat d'Ohio als Estats Units. Destaca pel seu rècord mundial en temps d'airtime amb 27.2 segons. L'airtime és un concepte relacionat amb les forces G. La força G quotidiana que sentim és 1, o sigui, la gravetat. No obstant això, durant uns segons abans d'una gran baixada en una muntanya russa, aquesta força G és menys d'1, el nostre cos experimenta la sensació de “flotar” en el seient.

Aquesta atracció és híbrida entre fusta i acer, amb 4 inversions i més de 1800 metres de longitud. Des de fora, aquesta muntanya té un aspecte desordenat en conseqüència de la quantitat de suports d'acer i fusta que té, destacant l'elevació inicial de 62 metres.



Imatge 11. Steel vengeance. Imatge extreta de:
https://www.reddit.com/r/rollercoasters/comments/1afn eks/steel_vengeance_cedar_point/?tl=es-es



Imatge 12. Red Force. Imatge extreta de:
<https://greatbigstory.com/worlds-fastest-roller-coaster/>

4.4.3 The Smiler

És una atracció que es troba al parc d'atraccions Alton Towers, ubicat en Staffordshire, Regne Unit. És molt popular pel títol de la muntanya amb més inversions amb un total de 14 amb un disseny únic gràcies al seu ambient “hipnòtic” gràcies a la quantitat d'espitals. Tot i que va trencar molts

records quan es va inaugurar el 2013, va ser tancada 4 vegades degut peces soltes i defectes en l'estructura. La més greu va originar el 2015 quan dos trens van col·lidir entre elles deixant 5 ferits.

4.4.4 Takashiba (高飛車)

És una atracció que es troba en el parc d'atraccions Fuji-Q Highland, en el Japó. Es va inaugurar l'any 2011 i es va consolidar automàticament com la muntanya russa amb la caiguda més inclinada del món amb 121° que fan arribar el tren fins als 100 km/h. No destaca molt pel seu recorregut, de 1004 metres, però gràcies a la seva localització s'hi tenen molt bones vistes al Mont Fuji.



Imatge 13. The Smiler. Imatge extreta de:
<https://coasterpedia.net/wiki/Smiler>



Imatge 14. Takashiba. Imatge extreta de:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Takabisha_under_construction_3.jpg

5 Components

En una muntanya russa hi trobem diferents parts i mecanismes que fan possible que el viatge sigui segur, emocionant i controlat. Cada component té una funció molt important, com ara fer pujar el tren fins al punt més alt, mantenir el vagó subjecte a les vies durant les corbes o frenar-lo de manera controlada al final del recorregut.

Encara que a simple vista només veiem les vies i els vagons, darrere hi ha tot un sistema pensat perquè res falli. Conèixer aquests components ens ajuda a entendre com funciona realment una muntanya russa i per què pot combinar velocitat, força i diversió sense posar en risc els passatgers.

5.1 Estació

L'estació o l'estació de sortida és el lloc on els passatgers pugen i baixen del tren, una zona molt important per a la seguretat. Els operaris comproven que totes les barres i cinturons estiguin ben tancats abans de sortir, i s'asseguren que tothom compleixen els requisits com l'alçada, l'edat o la posició.



Imatge 15. Estació de l'atracció Untamed. Imatge extreta de:
<https://www.flickr.com/photos/coastergallery/11312876805>

A més, l'estació també té un sistema d'organització i control, basat en Controladors Lògics Programables (PLC¹). Aquests PLC reben informació de sensors repartits pel recorregut i detecten si un tren està a punt d'entrar en un altre tram. Gràcies a això, es poden coordinar les sortides i evitar que dos trens coincideixin en la mateixa secció de la via. Tot això es troba normalment en la mateixa estació, però també és possible trobar habitacions ocultes a dins d'aquesta amb l'objectiu de mantenir la temàtica i la decoració de la muntanya.

Un aspecte important és l'efecte en cascada: si un tren es queda parat en algun punt del recorregut, els altres trens també s'han d'aturar, un darrere l'altre, per seguretat. Per evitar aquest inconvenient, es calcula els temps d'espera entre cada tren per aconseguir que cada tren surti només quan el recorregut està lliure i l'anterior ha arribat a l'estació o a una zona segura.

5.2 Sistema de llançament i mecanismes d'elevació

El sistema de llançament i els mecanismes d'elevació són essencials per donar-li energia inicial (potencial) al tren. Aquests mecanismes permeten iniciar el recorregut, ja sigui amb una pujada tradicional amb cadena o amb una acceleració brusca. D'aquesta forma assegurem que els vagons tinguin la velocitat necessària per lliscar per tot el circuit. Normalment, es troben al principi del recorregut, just després de sortir de l'estació.

En les muntanyes russes, podem distingir principalment dos sistemes d'inici. D'una banda, els turons ascensors, que utilitza una cadena o mecanisme per elevar el tren i acumular l'energia potencial. De l'altra, els sistemes de llançament que impulsen el tren amb gran velocitat des de l'inici mitjançant motors o altres mecanismes. Cada mètode té variacions i innovacions que han sorgit a partir del temps, però només tractarem els principals.

- Turó ascensor: Normalment, s'utilitza una cadena o un cable, que s'enganxa al tren i el puja de manera lenta i constant. L'objectiu principal d'aquesta pujada és preparar el tren per a la gran baixada, on tota l'energia acumulada es transformarà en velocitat per iniciar el recorregut.

¹ PLC: Els PLC són ordinadors industrials dissenyats per controlar màquines i processos de forma automàtica i segura. Destaquen per la resposta instantània en cas d'emergència a part d'una alta fiabilitat i resistència a la calor i vibracions.

Per produir el moviment, s'utilitza un motor elèctric que impulsa la cadena o el cable. Aquest motor transmet la força necessària perquè el tren pugi lentament fins al punt més alt, on l'energia potencial també és màxima.

Els turons ascensors poden funcionar amb diferents sistemes, però la més típica és el pla inclinat amb cadena. En aquest cas, un motor elèctric mou una cadena que arrossega el tren per un pla inclinat, però també existeixen altres tipus, com els elevadors verticals o els sistemes amb cables de tracció.



Imatge 16. Colina ascensora. Imatge extreta de:
https://en.wikipedia.org/wiki/Lift_hill#/media/File:Six_Flags_Great_Adventure_-_Nitro_lifthill.jpg



Imatge 17. Cables de tracció. Imatge extreta de:
https://coasterpedia.net/wiki/Cable_lift#/media/File:Millennium_Force_cable_tensioners.jpg

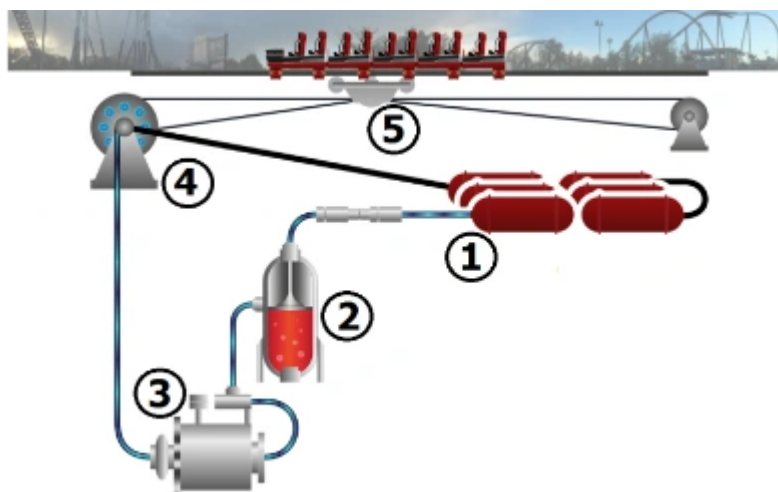
Sistema de llançament: En aquest mètode, el tren s'accelera fins a la seva velocitat màxima en pocs segons proporcionant la suficient energia cinètica des del principi per fer tot el recorregut. Normalment, és recta i lleugerament inclinada cap amunt, per permetre que, en cas de pèrdua de potència (rollback), el tren retrocedeixi cap enrere de manera controlada.

N'hi ha 3 tipus:

- Electromagnètic: En aquest sistema s'utilitza fluids a pressió i pistons hidràulics per generar una acceleració molt ràpida. Permet velocitats elevades en pocs segons i és habitual en muntanyes russes extremes com Red Force ubicat a Ferrari Land que assoleix una velocitat inicial de 180 km/h en menys de 5 segons. En aquest sistema

es fa servir per motors lineals electromagnètics (LSM² o LIM³) per accelerar el tren de manera suau i precisa, sense contacte mecànic directe. Aquest sistema és més silenciós i ofereix molt control sobre l'acceleració.

- Hidràulic: El sistema de llançament hidràulic utilitza un cotxe de captura connectat a un cable, unit al tren. En un extrem es troba el motor hidràulic, que bombeja oli cap a uns acumuladors formats per dues cambres separades per un pistó. A mesura que l'oli entra, comprimeix el nitrogen de l'altra cambra, augmentant-ne la pressió. Quan aquesta pressió és suficient, el nitrogen empeny el pistó amb força, fent que el cilindre provoqui que el tren surti a gran velocitat.
- Pneumàtic: En aquest sistema s'utilitza l'aire comprimit per impulsar el tren cap endavant. És similar a l'hidràulic en funció, però més lleuger i amb menys components mecànics.



Imatge 18. Motor hidràulic. Imatge extreta de:

<https://rollercoaster.fandom.com/wiki/Hydraulic>

² LSM: Linear Synchronous Motor. Es un tipus de motor que fa servir camps magnètics sincronitzats amb imans situats al vagó. S'obté una acceleració molt alta i controlada.

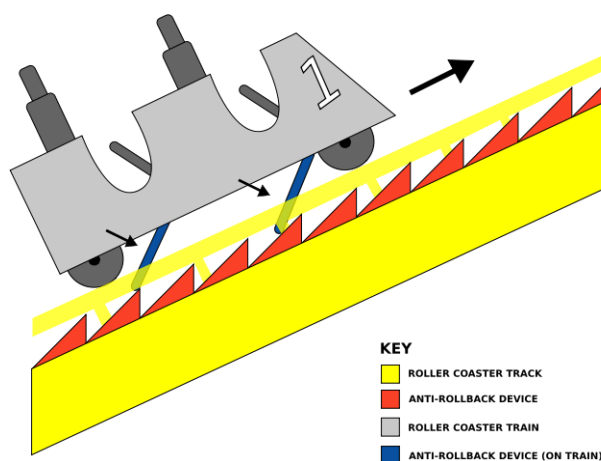
³ LIM: Linear Induction Motor. Similar al LSM però induïx corrents elèctriques a una placa metàl·lica situada al tren. Aquesta tecnologia és molt més simple.

5.2.1 Rollback

Moltes vegades, a causa del roçament de l'aire o una lubricació insuficient a les vies, es pot produir un rollback. El rollback és un fenomen que pot aparèixer en sistemes de llançament quan el tren no aconsegueix prou velocitat per arribar a acabar la primera pujada i torna enrere a causa de la gravetat.

Tot i que pot semblar inesperat i insegur, està previst a dins del disseny i la seguretat de l'atracció. Les vies normalment estan equipades amb frens magnètics o mecànics que controlen el moviment del tren i eviten qualsevol impacte o perill. En la majoria dels casos, després d'un rollback, el tren és llançat de nou amb més potència fins a assolir l'alçada necessària, però en altres directament es tanca l'atracció momentàniament durant unes hores.

D'altra banda, en els mecanismes d'elevació existeix el sistema anti-rollback que és un mecanisme de seguretat present als turons ascensors per evitar que el tren torni en cas de fallada. Funciona mitjançant dents o panys situats sota les vies i unes peces al tren anomenades dog o pall que eviten que el tren retrocedeixi en cas d'error i és el causant de produir el característic so "clac-clac".



Imatge 19. Sistema anti-rollback. Imatge extreta de:
https://coasterpedia.net/wiki/Chain_lift#/media/File:Anti-rollback.png

5.3 Vagó i tren

El vagó és una plataforma mòbil que porta als usuaris per tot el recorregut de l'atracció. El conjunt de vagonets formen el tren que, depenent dels seients i la quantitat de vagonets, es poden arribar a portar fins a 36 passatgers per tren (4 en cada vagó amb 9 vagonets) com el cas de Superman: Krypton Coaster ubicat al parc Six Flags Fiesta Texas.

Un dels aspectes més importants en el disseny d'una muntanya russa és el lliscament entre el vagó i la via, ja que el moviment del tren depèn directament de com hagin interactuat. Normalment, el procés de disseny comença definint el tipus de seient, establint un radi mínim permès i fixant una altura mínima en els punts on el vehicle i la via es creuen, per garantir seguretat i un funcionament correcte.

Dins del vagó podem trobar 2 grans variables: les rodes i la configuració dels seients.

5.3.1 Les rodes

N'hi han diferents tipus de rodes amb diferents finalitats específiques:

- Rodes de fricció lateral: Se situen al lateral de raïl i són molt importants perquè el vagó es mantingui alineat a la via seguint el trajecte que fa. Aquestes ajuden també a agafar de forma suau corbes i canvis de direcció aportant una millor sensació a l'experiència.
- Rodes de càrrega o rodament: Es troben a dalt de la via i a la part inferior del vagó. Són les més visibles i porten tot el pes del vagó i són els responsables del moviment del vagó al llarg de la via.
- Rodes anti elevació: Es troben a la part inferior de la via. Aquestes tenen la funció d'evitar que el vagó s'aixequi quan es presenten elements com inversions o vibracions fortes. Fan un efecte d'encaixament de seguretat al raïl.



Imatge 20. Rodes d'un vagó. Imatge extreta de:
https://en.wikipedia.org/wiki/Roller_coaster_wheel_assembly#/media/File:Roller_coaster_wheels.jpg

5.3.2 La configuració dels seients

La configuració dels seients és un aspecte clau a l'hora de dissenyar i construir una muntanya russa perquè per aquesta i el disseny de la via, es determina el moviment i el comportament al llarg del recorregut. Evidentment, la configuració també dona lloc a la capacitat de passatgers i la forma de tindre vagó. Per aclarir, normalment les muntanyes russes no-convencionals es fan d'acer mentre que les simples es fan de fusta a causa de les diferències dels materials anteriorment explicats.

Segons aquestes disposicions, podem trobar diferents estils:

- Estil convencional: Aquesta és la disposició tradicional amb vagons i seients alineats en un vagó que es troba a dalt de la via.



Imatge 21. Shambala ubicat a PortAventura. Imatge extreta de:
<https://www.xn--montaasrusas-chb.net/imagenes-shambala-expedicion-al-himalaya-jpg>

- Estil “Wing” o “ala”: En aquest cas els seients es distribueixen als costats del raïl, semblant a les ales d’un avió oferint una sensació més lliure.



Imatge 22. Furyus Baco. Imatge extreta de:
<https://www.xn--montaasrusas-chb.net/Imagenes/montana-rusa-furius-baco.jpg>

- Estil “Floorless” o “flotant”: Els seients es troben subjectats a l’estructura sense terra sota els peus, aspecte que intensifica les emocions en inversions.



Imatge 23. Atracció Krake. Imatge extreta de:
https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Krake_Heide_Park_4.jpg

- Estil invertit: Totalment, el contrari al convencional, els seients es troben a la part inferior de la via, penjats d'uns braços d'acer molt resistents que es connecten amb el sistema de rodes.



Imatge 24. Nemesis New Reborn. Imatge extreta de:

https://altontowers.fandom.com/wiki/Nemesis_Reborn

- Estil 4D: Els seients es troben als costats de les vies i giren sobre un eix independentment del moviment del tren creant una experiència impredecible i molt caòtica.



Imatge 25. Atracció X2. Imatge extreta de:

<https://www.tripsavvy.com/six-flags-magic-mountain-p3-3224573>

5.4 Frens

Els frens són un element de control que normalment es troben al final del recorregut, però també és molt comú col·locar sistemes de frenada al mig d'alguns recorreguts. Aquestes són molt útils a l'hora de gestionar la velocitat perquè són un recurs molt accessible per dissipar l'energia cinètica que agafa el vagó.

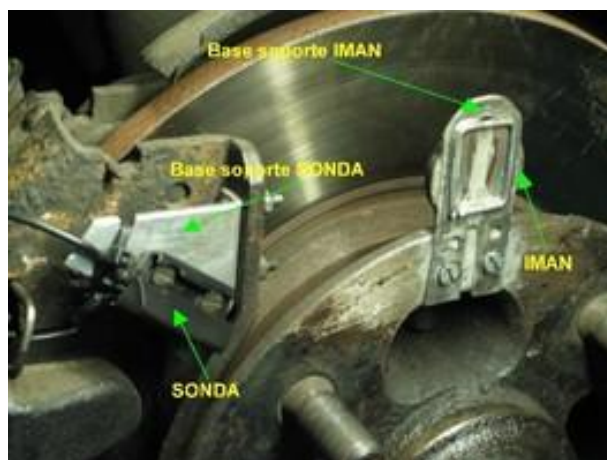
Tot i això, la majoria de les muntanyes russes no presenten cap mena de sistema de frenada en el vagó. Els frens es poden controlar de dues formes diferents, mitjançant un programa informàtic o per frens. D'accionament manual, on els operadors de les atraccions controlen les palanques de la mateixa muntanya russa.

Els frens es divideixen principalment en 3 tipus: frens d'aleta, frens pneumàtics i frens magnètics.

- Frens d'aleta: És el que més es fa servir actualment per la seva simplicitat. Consta d'una o diverses plaques de metall anomenades aletes que es troben obertes en un estat inicial, però que quan cal reduir la velocitat, es troben unes pinces o mordasses a la via que tanquen i subjecten les aletes frenant el vagó per culpa de la fricció.
- Frens pneumàtics: es fa servir un compressor d'aire per emmagatzemar aire d'uns dipòsits que estan controlats per vàlvules electròniques. Aquestes controlen el pas d'aire cap als frens que actuen girant en sentit contrari al tren frenant-lo.
- Frens magnètics: Fan servir força magnètica per parar el vagó. Es col·loquen uns imans molt potents a les vies per produir un camp magnètic que accionen plaques frenant el vagó.



Imatge 26. Frens pneumàtics. Imatge extreta de:
<https://fisicatraccion.weebly.com/sistemas-de-frenado.html>



Imatge 27. Frens magnètics. Imatge extreta de:
<https://fisicatraccion.weebly.com/sistemas-de-frenado.html>

5.5 Fonaments i suports

Els fonaments són l'estructura soterrada que àncora i suporta tota la muntanya russa. Sense uns fonaments sòlids, l'atracció seria inestable i insegura. Aquestes són com les arrels d'un arbre que transfereixen totes les forces de la muntanya cap a la terra. Per aconseguir-ho, es crea a partir d'una combinació de formigó amb barres d'acer en l'interior.

Tot seguit es troben els suports que connecten la via amb els fonaments. Aquestes són com el tall d'una planta, però fets d'estructures metàl·liques (normalment l'acer) que formen l'esquelet de l'atracció. La seva funció principal és mantenir la via en una posició i alineació adequada pel correcte funcionament de la muntanya i per fer això solen adoptar formes geomètriques, principalment, els triangles perquè donen molta estabilitat a l'estructura.



Imatge 28. Steel vengeance. Imatge extreta de:
<https://www.pa-community.com/parques/cedar-point/atracciones/steel-vengeance>

6. Funcionament

6.1 Les lleis de Newton

Per explicar el comportament físic del vagó a dins d'una muntanya russa, ens centrarem en les lleis d'Isaac Newton. La primera, coneguda com a llei d'inèrcia, explica que: "Un cos en repòs romandrà en repòs, i un cos en moviment romandrà en moviment a velocitat constant, tret que actuï sobre ell una força externa." D'aquesta manera podem explicar que, el tren normalment tendeix avançar en línia recta, però que, gràcies a les rodes de fricció lateral, el tren pot experimentar forces centrípetes a les corbes que canvien la seva trajectòria.

A partir d'aquí arribem a la segona llei, coneguda també com a llei fonamental de la dinàmica que relaciona el moviment dels cossos amb la força i les respectives masses. Newton formula la següent igualtat en base aquesta afirmació: $\Sigma F = m \cdot a$. Això es pot relacionar directament amb el moviment de les muntanyes russes, ja que la gravetat de la Terra és una força que accelera el tren cap avall i en trams de baixada és el principal responsable del moviment del tren.

Finalment, trobem la tercera llei, acció i reacció. Aquesta llei afirma que: "Quan un cos exerceix una força sobre un segon cos, aquest segon exerceix una força igual i oposada sobre el primer". Aquesta llei és la responsable de la força normal que contraresta la força gravitatòria que trobem a les rodes de càrrega i en el cas contrari, les rodes de seguretat a la part inferior de la via experimenta una força cap avall evitant l'aixecament del vagó. En conseqüència, la força que ens permet gaudir d'inversions i altres elements d'emoció a les atraccions és gràcies a aquesta llei.

Per descriure les sensacions que podem arribar a sentir en un recorregut, podem fer servir les forces G i trobem 3 casos:

- Forces G positives ($>1G$): Normalment a baixades i els finals de corba experimentem un força que ens pressiona contra el seient.
- Forces G Negatives ($<1G$): En canvis bruscos d'alçada i al pic d'algunes pujades podem experimentar una forta sensació d'ingravedesa. Aquesta sensació es pot classificar en 2 tipus: flotador i d'expulsor. Tot i que depèn de l'usuari, es considera flotador quan la força oscil·la entre 1 i 0, però quan aquesta baixa a nombres negatius, es considera expulsor.

- Forces G laterals: En corbes horitzontals molt tancades experimentem una força que ens porta cap a l'exterior.

6.2 La llei de la conservació de l'energia

Un altre aspecte clau del funcionament de les muntanyes són les energies. A les muntanyes russes hi actuen principalment 2 energies: La potencial gravitatòria i la cinètica. Aquestes es regeixen amb diferents paràmetres, les fórmules són les següents:

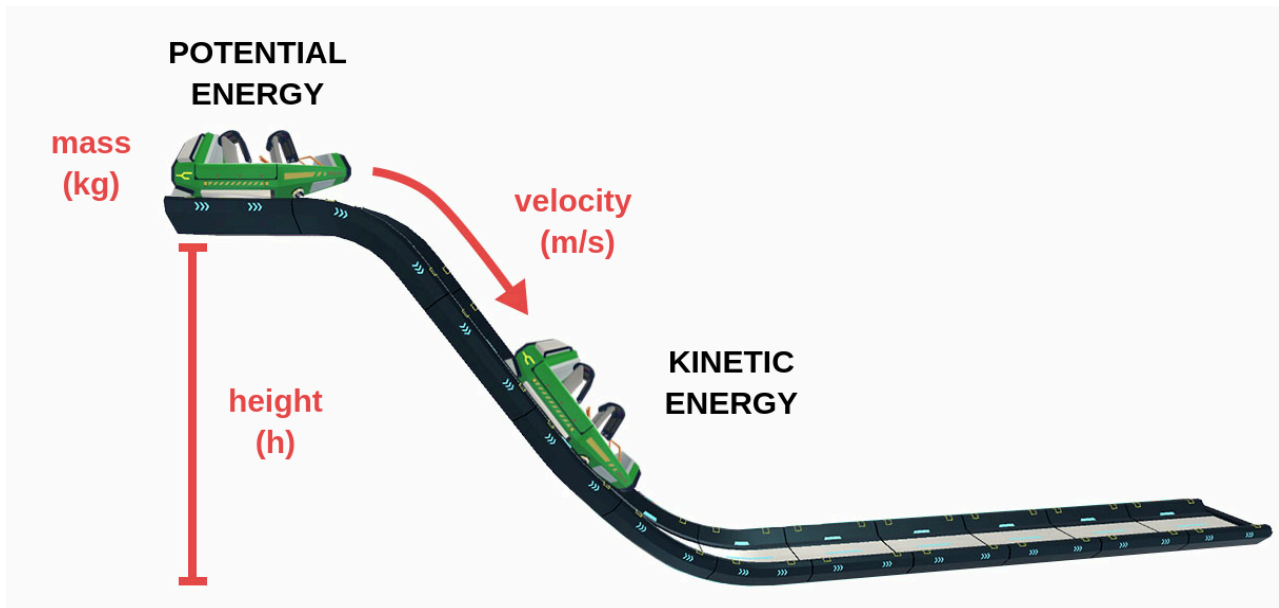
$E_p = m \cdot g \cdot h$. L'energia potencial és el resultat del producte de la massa, la gravetat i l'alçada.

$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. L'energia cinètica, en canvi, és el resultat del producte d'un mig, la massa i la velocitat al quadrat. Tanmateix, la suma d'aquestes dues s'anomena energia mecànica.

La llei de la conservació de l'energia ens explica que l'energia ni es crea ni es destrueix, sinó que només es transforma creant un cicle.

El cicle comença quan el tren és elevat fins al punt més alt del recorregut, on acumula el màxim d'energia potencial. En ser alliberat, aquesta energia es converteix en energia cinètica durant el descens, propulsant el tren a alta velocitat. A mesura que després enfronta noves pujades, la velocitat es redueix transformant part de la seva energia cinètica novament en energia potencial.

A mesura que el tren avança pel recorregut, la fricció amb els rails i la resistència de l'aire van dissipant energia en forma de calor i so. Aquesta pèrdua gradual d'energia fa que el vagó perdi velocitat de manera natural, fins a aturar-se al final del circuit sense necessitat d'utilitzar frens addicionals. Degudes aquestes energies externes (tèrmica i acústica), l'energia mecànica total disminueix. No obstant això, no vol dir que el sistema perdi energia, vol dir que si se suma a l'energia mecànica total, arribem un altre cop a la inicial.

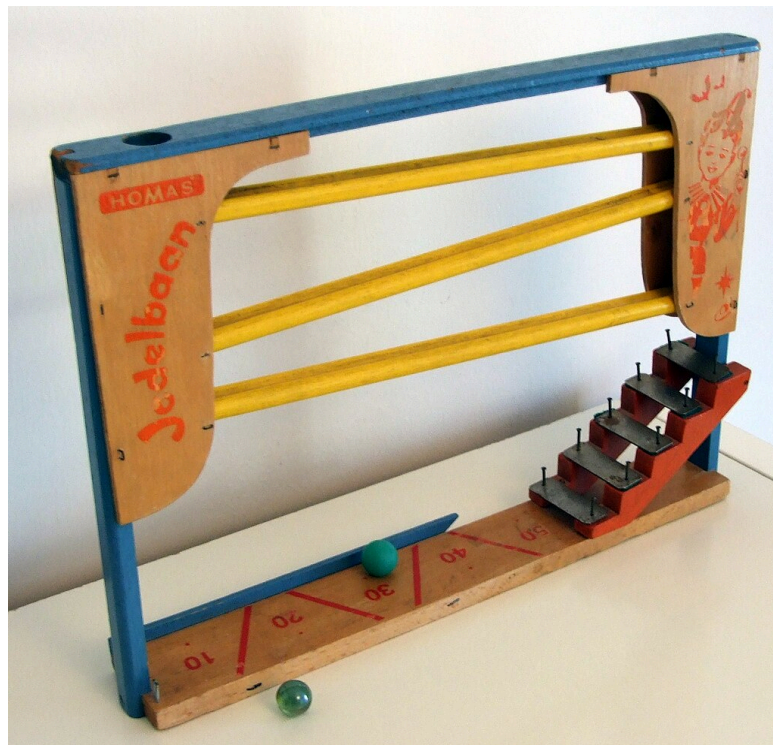


Imatge 29. Esquema energia mecànica. Imatge extreta
de: https://theory.labster.com/kinetic_energy/

7. Els circuits de bales

7.1 Què és un circuit de bales?

També conegut com a pista de bales, un circuit de bales és una estructura dissenyada principalment perquè una bala es pugui moure seguint un recorregut determinat a causa de la gravetat. Aquestes estructures poden ser de molts materials i de formes molt diferents a part del material de la bala. Normalment, estan enfocats a l'entreteniment i l'art donat els seus moviments fluids i les combinacions estètiques possibles que es poden fer a l'estructura. Per això normalment són considerats joguines o peces d'art.



Imatge 30. Circuit de caniques de joguina Imatge
extreta de:

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

A més, els circuits també poden tenir un valor educatiu molt potent. Aquestes estructures fomenten la percepció espacial, les capacitats cognitives i l'habilitat constructiva gràcies al fet que moltes vegades aquests circuits contenen parts mòbils que deixa pas als nens a un infinit de possibilitats.

Tanmateix, no es limita a només a l'educació dels nens, també és una eina científica perquè els circuits de bales són una manera senzilla i molt visual de veure conceptes físics com la gravetat o la inèrcia.



Imatge 31. Joguina per a nens Cuboro. Imatge extreta de:
[https://es.wikipedia.org/wiki/Pista_de_canicas#/media/Archivo:Cuboro_Bahn1.J](https://es.wikipedia.org/wiki/Pista_de_canicas#/media/Archivo:Cuboro_Bahn1.JPG)
[PG](#)

7.2 Tipus de circuits de bales

Els circuits de caniques es poden classificar segons diferents criteris:

- Segons el material: Els primers circuits de bales eren normalment fetes de fusta i metall, però amb el pas del temps hem evolucionat a materials com el plàstic o el filament d'impressió 3D.
- Segons el funcionament: Depenent de com funcionin es poden classificar de dues maneres:
 - Gravitacionals: Depenen només de la força gravitacional terrestre.
 - Motoritzats: Inclouen motors i altres mecanismes que normalment porten la bala al punt inicial o, es col·loquen en punts estratègics del recorregut per donar-li més energia.
- Segons la complexitat:
 - Circuits senzills: Totes les rampes rectes i formes senzilles entren en aquest apartat.
 - Circuits de mòdul: Com el nom indica es poden intercanviar les peces. Les joguines per a nens entren en aquest apartat com per exemple el GraviTrax o Hubelino.
 - Circuits mecànics: Aquests inclouen ascensors, sistemes d'engranatges i motors que mecanitzen el sistema.



Imatge 32. Joguines Hubelino. Imatge extreta de:
<https://www.hubelino.com/products/hubelino/marble-run/>



Imatge 33. Gravitrax. Imatge extreta de:
<https://www.toysrus.es/Ravensburger-GraviTrax-GO-Flexible%2C-Sistema-Vers%C3%A1til-de-Pistas-de-Canicas-%E3%85%A4/p/K1062898>

7.3 Física dels circuits de bales

La física és un dels aspectes més interessants dels circuits de bales, ja que el moviment de la bala es pot explicar mitjançant els mateixos principis que regeixen el funcionament de les muntanyes russes com les lleis de Newton. Trobem una correlació directa perquè quan la bala es troba en una posició elevada, posseeix energia potencial gravitacional, que es transforma en energia cinètica a mesura que descendeix pel circuit.

En un sistema ideal, l'energia en mantindria constant pel principi de conservació de l'energia, però tal com passa a les muntanyes russes, per culpa del fregament i les col·lisions, es perd energia en forma de so i calor.

En últim lloc, el disseny del circuit és el responsable del comportament físic de la bala. Tots els elements que es fan alteren al moviment. Elements com corbes o inversions s'han de calcular per garantir que pugui completar el recorregut sense aturar-se i perquè no surti fora del circuit per un excés de velocitat. Per tant, podem concloure que són una manera molt pràctica d'estudiar els principis d'energia juntament amb les forces i el moviment.

8. Part pràctica

Arribat a aquest moment, crec que he investigat i he adquirit els coneixements necessaris per dissenyar i construir el meu propi circuit de bales. En aquesta part pràctica parlaré de les etapes de la creació d'un model de bales amb l'objectiu d'observar com la gravitació, la fricció i l'energia cinètica i potencial afecten el moviment de la bala, així com comprovar el comportament de les boles en diferents seccions del recorregut.

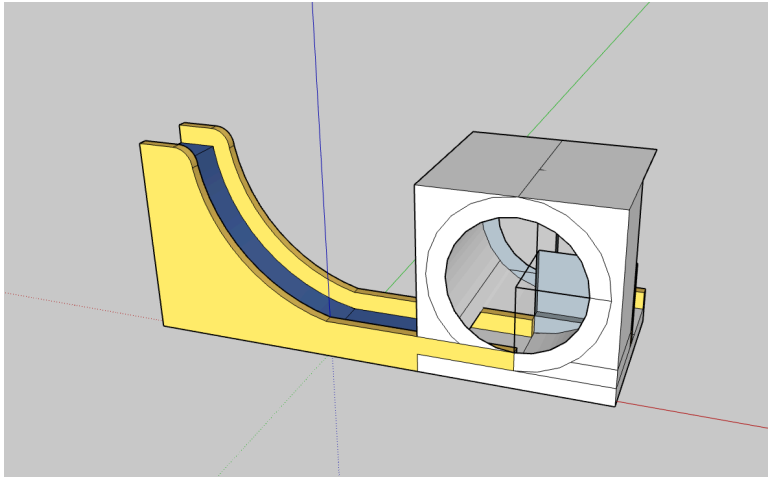
Inicialment, vaig contemplar la idea d'utilitzar cartó i cola per construir el circuit de boles, ja que és un mètode senzill i ràpid. Tanmateix, vaig decidir fer-lo en 3D perquè d'aquesta manera es pot obtenir més precisió en les mesures, aconseguir un disseny més resistent i durador, i poder reproduir les peces amb exactitud en el futur. Així, el circuit no només seria funcional, sinó també més professional i estable.

8.1 Sketchup i model 0

Dins d'aquest context, vaig intentar crear un model sense basarme en cap classe de càlcul d'alguna part senzilla com un loop utilitzant el programa SketchUp Web, una eina en línia de modelatge 3D desenvolupat per l'empresa Trimble.

Aquest programa permet fer de forma ràpida figures senzilles i poder representar-les en 3D. El prototip que jo havia previst fer en aquest primer moment comptava amb una petita rampa per donar-li energia i el mateix bucle. Als costats vaig posar dues parets o tanques per posar límits i finalment un carril central per on hauria de passar la bala.

Tot i que ja tenia experiència utilitzant aquest programa gràcies a nombrosos projectes fets a l'ESO, em vaig adonar que presenta dificultats a l'hora de dissenyar superfícies corbes i formes complexes, cosa que va complicar la representació precisa del recorregut. A causa d'aquestes limitacions, vaig decidir cercar un altre programari més adequat per al modelatge d'elements propis d'una muntanya russa.



Imatge 34. Loop a Sketchup. Imatge pròpia



Imatge 35 Logo Sketchup. Imatge extreta de:
<https://3dwarehouse.sketchup.com/model/a623a610-3230-483c-9d3e-fda9677975fd/SketchUp-logo?hl=es>

8.2 Programa 3D

Donades les complicacions a Sketchup, vaig necessitar un programa 3D capaç de complir amb els requisits específics que garantissin la viabilitat del meu projecte. Els requisits que jo cercava van ser principalment:

- Disseny precís: que tingui control mil·limètric.
- Eines de modelatge sòlid: Les operacions com la unió, la resta i la intersecció són essencials per crear figures complexes mitjançant la combinació de sòlids. El programa havia de garantir que tots els models estiguin tancats i sense errors, a més de verificar els errors abans de la impressió.
- Eines d'esbossos i extrusió: La capacitat de crear esbossos en 2D amb restriccions geomètriques és molt important, així com les eines d'extrusió i revolució que et deixen generar volums a partir d'aquests perfils en 2D.
- Preu: Aquest és un requisit imprescindible, ha de ser gratuït o almenys contemplar una opció gratuïta amb limitacions.

Esmentades totes les condicions, el programa Autodesk Fusion 360 es va presentar com la solució ideal, ja que combina totes les funcions necessàries que necessitava. Aquest programa va ser desenvolupat per l'empresa nord-americana AutoDesk i és un programa de disseny 3D professional especialment orientat al disseny mecànic i la fabricació. Aquesta empresa va ser fundada l'any 1982 i és reconeguda per la creació de programes utilitzats internacionalment de disseny, enginyeria i arquitectura com AutoCad, Revit o el mateix Fusion 360.

El programa ofereix una llicència gratuïta per a ús personal i no comercial, és a dir, adequada per a estudiants, aficionats o projectes educatius com el meu. Aquesta versió permet utilitzar gairebé totes les funcions del programari sense cap cost, sempre que no es faci servir amb finalitats professionals o comercials. Tanmateix, Autodesk Fusion també disposa de diferents tipus de llicències destinades a diferents usos. Per exemple, la llicència educativa, que, com el nom indica, dona accés gratuït al programari a estudiants, professors i institucions acadèmiques. També trobem la llicència professional, que és de pagament mensual i està pensada per a empreses i professionals del disseny.



Imatge 36: Logo Autodesk Fusion 360. Imatge extreta de:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusion360_Logo.svg

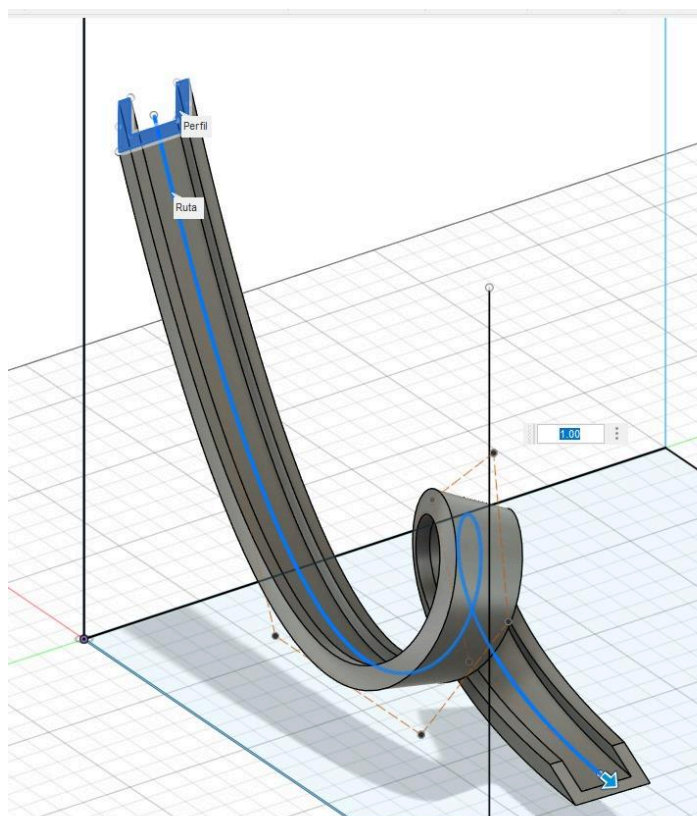
8.3 Prototip 1

Aquest primer prototip va ser el meu primer contacte amb el programa i consisteix en un model molt primitiu que tracta només d'un looping experimental per veure la viabilitat del programa per fer el meu circuit. Consta pràcticament del mateix mencionat al model 0 que es va intentar fer a Sketchup però sense els suports.

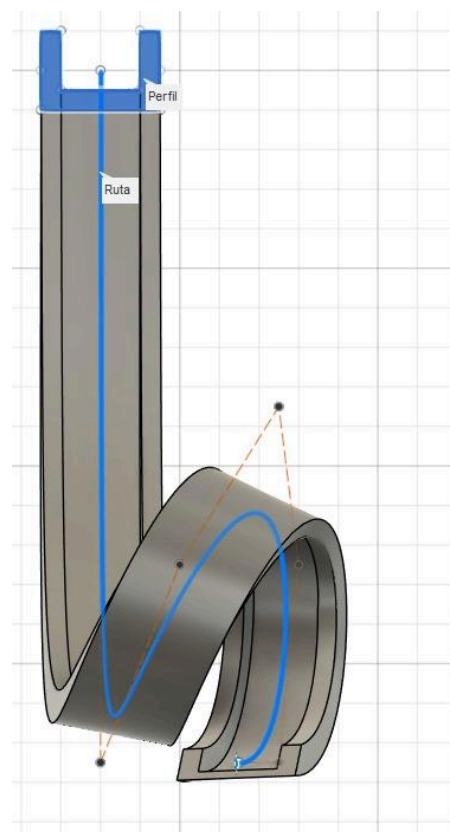
Per crear aquest prototip el primer pas va ser crear un cub de 200 mil·límetres on es va fer tot el prototip. Tot seguit vaig crear un perfil amb una altura considerable connectat a un raíl guia que feia

un loop en el seu recorregut. Seguidament, amb l'eina “escombrat” o “barrido” en castellà vaig donar-li profunditat al perfil. El resultat original era un perfil final inclinat que va donar molts problemes i que vaig aconseguir resoldre parcialment configurant-lo amb una torsió de -70 a -80 graus.

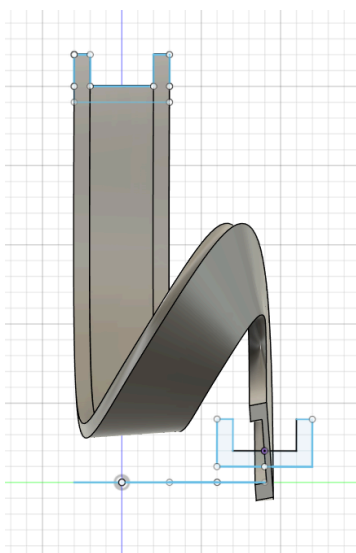
Finalment, vaig exportar el model en format STL per poder-lo imprimir amb una impressora 3D.



Imatge 37. Loop . Imatge pròpia



Imatge 38. Loop . Imatge pròpia



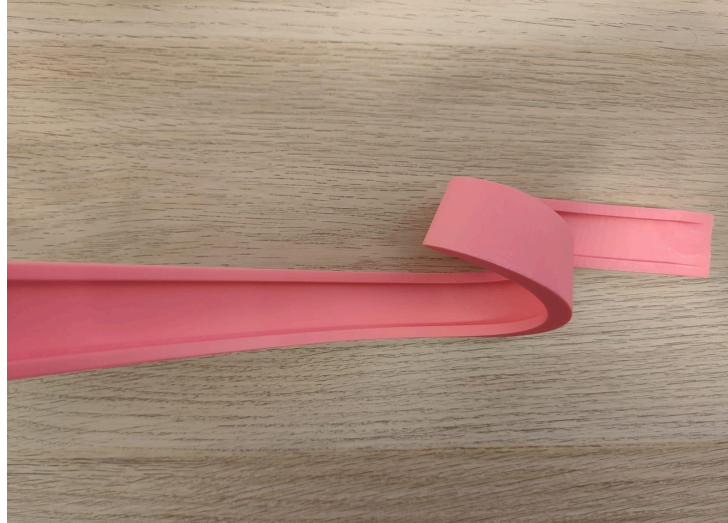
Imatge 39. Loop . Imatge pròpia

Aquest pas va ser essencial per passar del disseny digital a l'objecte físic real. Un cop generat l'arxiu, vaig enviar-ho al meu tutor, que va configurar la impressora 3D ajustant paràmetres com la resolució, la densitat de farciment i la velocitat d'impressió segons les necessitats de cada peça i finalment vam imprimir el primer prototip.



Imatge 40: Impressora 3D BambuLab X1C. Imatge extreta de:
<https://bambulab.com/es/x1>

La impressora 3D que es va fer servir és la BambuLab X1C desenvolupat per l'empresa BambuLab. Aquest és un model d'alta velocitat amb capacitat de nivellació automàtica i compatibilitat amb materials tècnics. Amb un volum d'impressió de 256 mm en cada dimensió i una acceleració de fins a 20 000 mm/s², permet imprimir amb gran precisió i rapidesa. Afortunadament, a l'aula de tecnologia del nostre centre compta amb 4 unitats d'aquestes impressores, cosa que va accelerar el procés d'impressió.



Imatge 41. Loop físic . Imatge pròpia

Tot i que el model no presentava suports ni fonaments (fet que el feia estructuralment inestable), el resultat va ser plenament funcional. La bola era capaç de completar el loop sense cap dificultat, demostrant que un disseny 3D d'un circuit complet era possible.

Per aquest motiu, considero aquest primer model com un punt de partida exitós per al desenvolupament de versions posteriors més estables i optimitzades.

8.4 Prototip 2

A l'hora de fer aquest model era clar que volia un disseny complet i tancat. En aquest model, per intentar resoldre el problema de la torsió al final del loop, vaig decidir fer servir l'eina "loft" en lloc de "escombrat". Aquesta eina et dona la possibilitat d'unir dos perfils amb un raíl guia o no i justament vaig fer servir un raíl guia per indicar que faci un loop abans d'arribar a l'altre perfil.

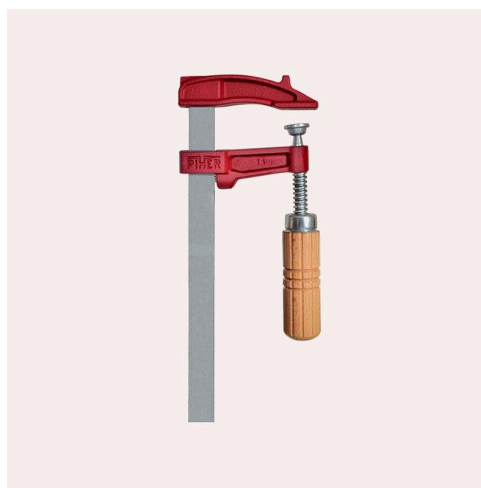
Tot i que el loft es va completar de manera adequada, va presentar una deformació a les tanques del circuit que lamentablement, feien perdre molta energia a la bala. A més, la impressió d'aquesta peça va sortir amb irregularitats en forma de petites línies o solcs, que provoquen que la bala faci salts lleugerament en alguns punts del recorregut i que tinguin xocs en altres. Degudes aquestes irregularitats, en el model físic la bala no era capaç de completar el circuit.

Per intentar resoldre el problema de les irregularitats, es va intentar fer servir paper de vidre per suavitzar les corbes i es va posar cinta adhesiva lisa a la superfície del recorregut. Aquestes millores van suposar un canvi notori al desenvolupament del gir, però no va ser suficient perquè faci el loop correctament un 100% de les vegades.

Per completar el circuit es va fer un altre corba que donava la volta per tornar al lloc inicial. Uns centímetres abans de l'inici, trobem un pla inclinat de 57 graus. Aquest pla inclinat final es volia convertir en un ascensor de bales mecanitzat amb un motor i va servir per veure quines proporcions s'havien de fer servir per aconseguir-ho.

A l'hora d'imprimir la peça, es va separar en 5, ja que el model complet no cabia a dins de la impressora. Malauradament, a l'hora de tallar les peces, el programa d'impressió es va tancar i no es va guardar les coordenades de l'últim tall, fet que va suposar un tall manual després de la impressió.

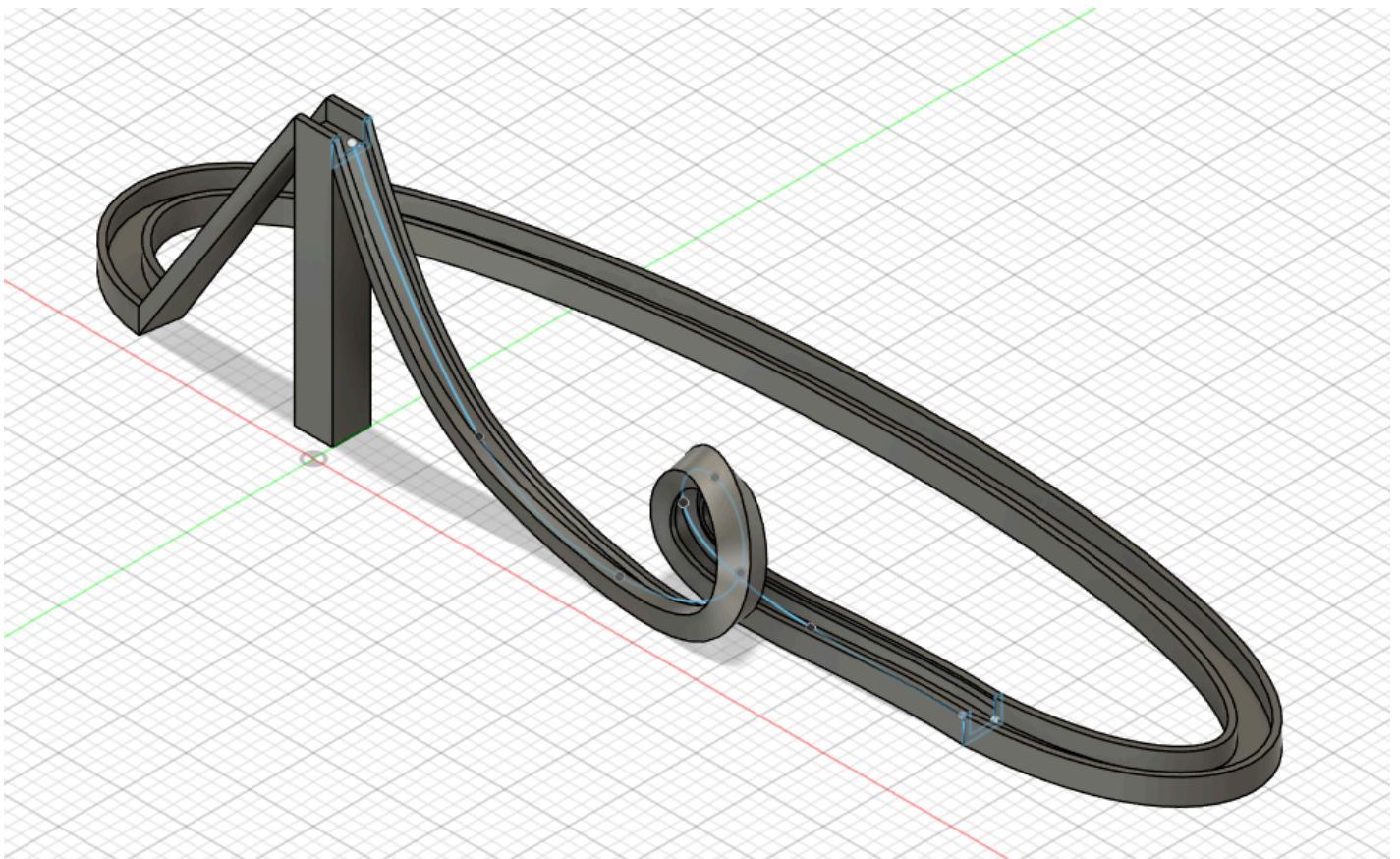
Per ajuntar les peces després de la impressió vaig provar diferents mètodes començant per la cola líquida adhesiva. La cola funciona molt bé quan les superfícies de contacte són planes i regulars, ja que permet una unió forta i sòlida. Tot i això, cal deixar les peces perfectament estables durant força temps perquè l'adhesiu s'assequi completament i assoleixi la seva màxima resistència. Per aconseguir-ho es fa servir un serjant amb una fusta per mantenir les peces immòbils.



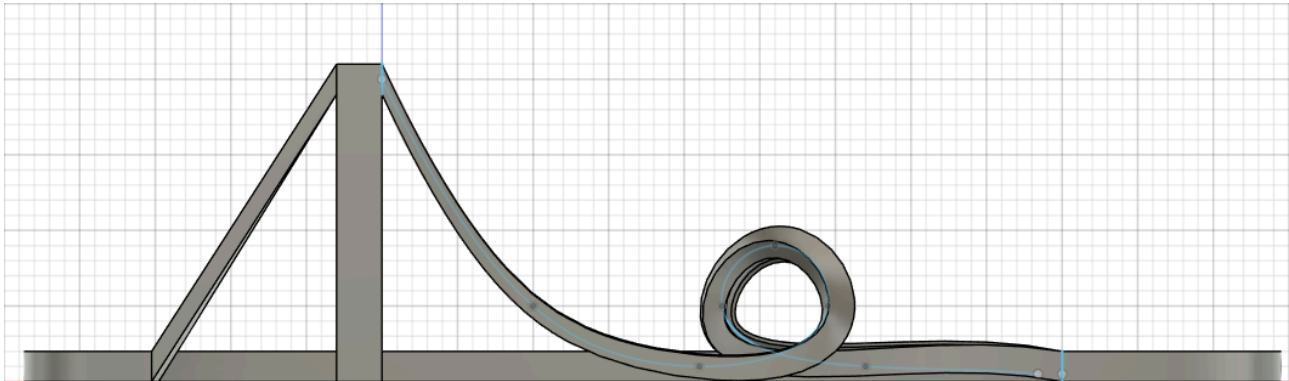
Imatge 42: Serjant . Imatge extreta de:
https://boiract.com/es/tienda/sargentos-pequenos-piher-modelo-mm/2170?srltid=AfmBOoobCwd7A_NbYyIA6wbFFflpb7iafIO3G4JHsBajfNSxbC7BW6PN

Malauradament, en superfícies amb corba, la cola no és molt útil, ja que es tendeix a moure per culpa de la geometria i no es pot fer servir un sergent perquè el suport no s'adapta a la corba. La solució a aquest problema es va trobar canviant el material adhesiu a silicona i fer servir una pistola de silicona comuna per pegar les peces. Aquestes no van quedar tan netes com les peces pegades amb cola i es van polir amb paper de vidre.

Aquest prototip contrasta molt amb l'anterior en el tema de l'estabilitat, perquè com es pot observar a les imatges, l'inici compta amb un pilar de suport a més que la major part del recorregut es troba al mateix nivell assegurant molta estabilitat.



Imatge 43 .Prototip 2 completat. Imatge pròpia



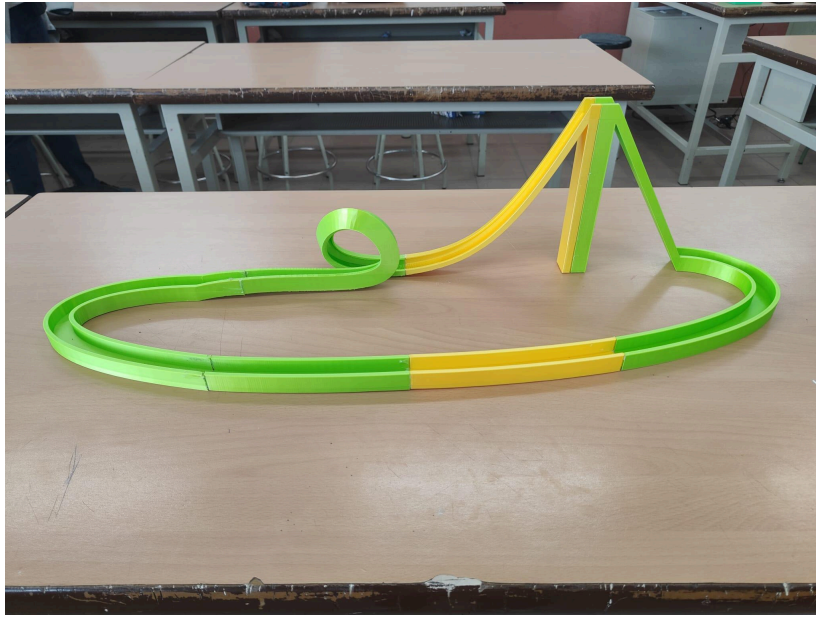
Imatge 44 .Prototip 2 completat. Imatge pròpia



Imatge 45 .Prototip 2 completat físic. Imatge pròpia



Imatge 46 .Prototip 2 completat físic. Imatge pròpia



Imatge 47 .Prototip 2 completat físic. Imatge pròpia

8.5 Prototip Final

Amb tota l'experiència obtinguda en els altres models, vaig començar a construir el meu model final. En aquest moment vaig aplicar tot el coneixement obtingut per desenvolupar un model funcional, estable i visual.

8.5.1 Càlculs

Els càlculs són un element imprescindible per desenvolupar un model funcional, per tant, s'han de raonar uns càlculs físics abans de començar a dissenyar el model final en el programa. Aquests càlculs ens permeten determinar les incògnites essencials com la velocitat que assoliran les bales en diferents punts del recorregut o l'alçada mínima necessària per garantir que completin el circuit.

A més, analitzar aspectes com l'energia potencial, l'energia cinètica i la fricció és fonamental per aconseguir un disseny funcional. D'aquesta manera, poden dir que el projecte i la part pràctica es basa en dades reals i no només en la intuïció, assegurant que el model final sigui precís i eficient.

Dividim els càlculs en diferents seccions amb l'objectiu de simplificar l'explicació. Donat que no coneixem totes les dades com la quantitat de fricció haurem de suposar-les o simplement implementar energia extra aproximant les pèrdues.

8.5.1.1 Loop inicial

Per començar a esbrinar les incògnites que busquem, vaig centrar-me en l'aspecte més complicat del meu model, o sigui, el loop inicial i el que vaig començar a calcular van ser els requisits mínims que haurien de manifestar-se en les mides.

Per trobar el primer requisit, igualet la 2 llei de Newton amb la força normal que experimenta la bala a dins del loop tenint en compte que aquesta és completament circular:

$$mg + N = m \frac{v^2}{R}$$

Tanmateix, calcularem la fórmula de la velocitat quan la força normal és 0, o sigui, el límit que es necessita per completar el loop.

$$mg = m \frac{v^2}{R}$$

Simplifiquem i aïllem la velocitat i trobem que la condició inicial que ha de complir el loop és

aquesta:

$$V \geq \sqrt{gR} \text{ ó } V^2 \geq gR.$$

La seva velocitat al punt més alt ha de superar l'expressió de la dreta per assegurar que completa el loop, ja que d'altra manera caurà abans de completar-ho.

8.5.1.2 Energies al loop inicial

Troben l'energia potencial amb altura (h):

$$E_p = mgh$$

Troben l'energia cinètica (De translació només):

$$E_c(\text{translació}) = \frac{1}{2}mv^2$$

Finalment, es troba l'energia rotacional (considerem que la bala és una esfera sòlida i massís):

$$E_{rot} = \frac{1}{5}mv^2$$

Sumem les dues últimes i les considerem com la suma total d'energia cinètica:

$$E_c = \frac{7}{10}mv^2$$

Per trobar l'altura mínima que necessita el circuit per començar ens fixarem en l'altura que assoleix el loop i farem un balanç energètic:

$$mgh = mg(2R) + \frac{7}{10}mv^2.$$

En aquesta fórmula, "R" representa el radi del loop. Per aconseguir aïllar l'altura (h), hem substituït v^2 per l'expressió que vam establir abans $v^2 = gR$ i simplifiquem la massa i la gravetat, ja que és un factor comú.

$$h = 2R + \frac{7}{10}R = 2,7R.$$

Per determinar el radi del nostre circuit, m'he basat en els prototips i 9 cm d'alçada va semblar un bon objectiu. Per tant, el radi serà 4,5 cm i substituint a la fórmula obtenim un valor de 12,15 cm d'alçada inicial.

Tanmateix, com vam aclarir abans, aquest és el cas límit on la bala hauria de ser capaç de completar el loop, però no es té en compte les forces de fricció, ni el fregament de l'aire. Aquest inconvenient es pot resoldre augmentant més l'altura inicial, en el meu cas he escollit un 40%. Per tant, haurem de multiplicar el nostre 140% el seu valor, donant un resultat de 17,01 cm.

A més de tot això, com hem vist en les proves amb els altres prototips, hem de tenir en compte que la bola fa petits salts quan baixa a causa de les irregularitats que es creen a l'hora d'imprimir i per culpa de això haurem d'augmentar una mica més l'altura inicial a més de remeiar-ho amb cinta lisa. Augmentem, doncs, una vegada més fins al 140% del valor i obtenim un valor de 23,81 cm.

Aquest últim valor es va aproximar a 24 cm per facilitar el disseny a l'hora de construir la peça en 3D i el fet que és més senzill treballar amb unitats enteres.

8.5.1.3 Pujada parcial

Tot seguit, vaig fer una reflexió sobre l'espectacle visual que pot donar la bala quan aquest completa el circuit i mitjançant els models dels prototips anteriors, m'he adonat que almenys, que personalment, és molt més agradable de veure com la bala completa el circuit amb una velocitat moderada que no pas una molt ràpida, ja que costa més de veure.

Tenint en compte això, s'ha de repartir l'energia que agafa la bala i s'ha de distribuir estratègicament per tota la pista perquè sigui capaç de completar-ho sense molta velocitat. Per aconseguir això, vaig plantejar una altra pujada just després del loop per agafar energia potencial repartir-la pel recorregut.

Per calcular aquest valor simplement multipliquem l'energia potencial inicial per 0.6 i obtenim l'altura màxima que es pot assolir després del loop i les pèrdues d'energia que es manifesten pel fregament.

$$hf = hi \cdot 0.6$$

El resultat d'aquesta operació dona 14,4 cm. Com es tracta del cas límit, haurem de baixar-ho segons la velocitat que volem. En el meu cas volia una velocitat moderada i, per tant, vaig dividir aquest valor entre 2 donant un resultat de 7,2 cm. Aquest valor es va aproximar a 7 cm per motius un altre vegada de disseny.

A partir d'aquest moment, el recorregut es torna en una baixada constant que es pot alçada i velocitat calcular mitjançant el principi de conservació d'energia amb la fórmula següent:

$$m \cdot hi \cdot g = m \cdot g \cdot hf + \frac{7}{10} \cdot m \cdot v^2 .$$

Aïllant la velocitat trobem la següent expressió:

$$v = \sqrt{\frac{10}{7} \cdot g \cdot (h_i - h_f)}$$

No obstant si s'inclouen les pèrdues d'energia, el resultat de l'operació anterior s'ha de multiplicar per $\sqrt{0.6}$, ja que la velocitat depèn de l'arrel quadrada de l'energia. A més, s'ha de sumar tota la velocitat que portarà fins aquell moment. Gràcies a aquestes igualtats calcularem la velocitat en diferents punts del circuit. Per tant, la fórmula final de la velocitat es pot calcular amb:

$$v_f = \sqrt{0.6 \cdot \frac{10}{7} \cdot g \cdot (h_i - h_f) + v_i^2}$$

Posició	Expressió	Velocitat
Inici (h=24)	No existeix	0 m/s
Després del loop vertical (h=7)	$\sqrt{0.6 \cdot \sqrt{\frac{10}{7} \cdot 9.81 \cdot (0.24 - 0.07)}}$	1.54 m/s
Abans del loop horitzontal	$\sqrt{0.6 \cdot \frac{10}{7} \cdot 9.81 \cdot (0.07 - 0.04 + 1.54^2)}$	1.295 m/s
Després del loop horitzontal	$\sqrt{0.6 \cdot \frac{10}{7} \cdot 9.81 \cdot (0.07 - 0.04 + 1.295^2)}$	1.16 m/s

8.5.2 Disseny

Des d'un principi el objectiu original del meu projecte era fer una maqueta d'un circuit de caniques amb un loop. No obstant, quan es va realitzar el segon prototip, em vaig adonar del gran espai que es podria aprofitar a la curva de tornada i investigant diferents elements dels circuits de bales, em vaig trobar un element anomenat "Roundabout" o "rotonda" en català on les bales giren en una mena de loops horitzontals consecutius i terminen caient per un forat al centre.



Imatge 48: Roundabout. Imatge extreta de:
<https://wtl.org.nz/home/pages/toy.php?idcat=1310>

A part, com es va explicar al prototip 2, es volia mecanitzar el circuit mitjançant un motor col·locat al final del recorregut que fa rotar una cadena que portarà la bala a dalt reiniciant el cicle i perpetuant el moviment.

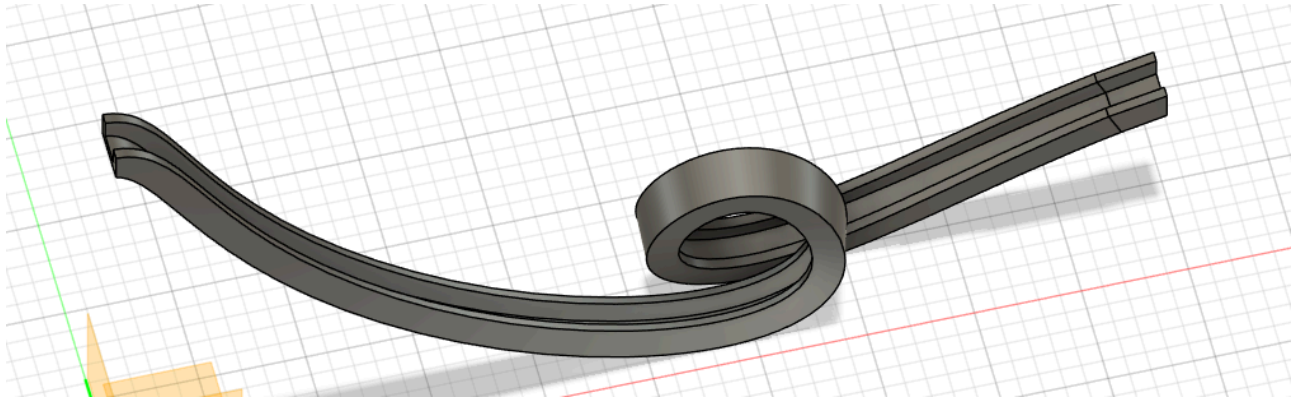
Finalment per sintetitzar, el model final havia de contenir els següents elements en ordre d'aparició:

1. Loop vertical
2. Pujada parcial
3. Baixada parcial amb corba
4. “Roundabout” o rotonda
5. Corba final
6. Pujada final amb cadena

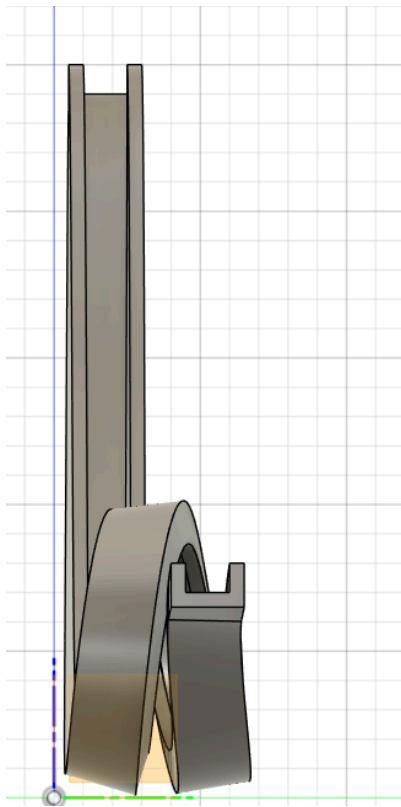
8.5.2.1 Loop vertical

Per fer aquest primer segment es va fer servir l'eina “escombrat” i un raíl guia creat mitjançant una línia “spline” que feia el recorregut del loop. Es van fer 2 perfils, un a l'inici a 24 cm en l'eix Y (alçada) de la base i l'altre 50 cm a l'eix X i 7 cm a l'eix Y (alçada). Donat que l'eina “escombrat”

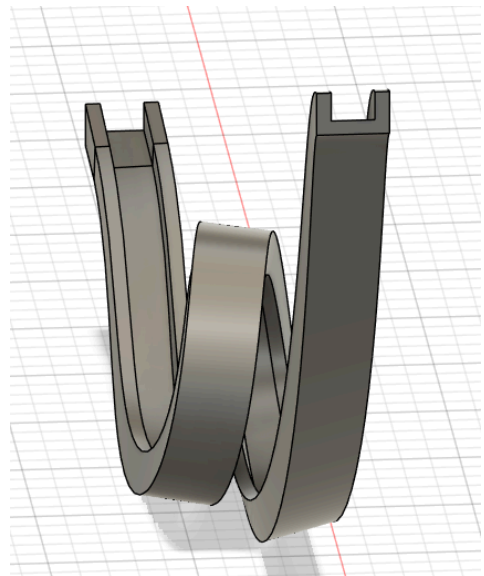
no deixa totalment recte el perfil, vaig fer servir “loft” per unir-lo amb l’altre perfil creat i d’aquest mode es va aconseguir arreglar el problema de la torsió.



Imatge 49 .Model final del loop. Imatge pròpia



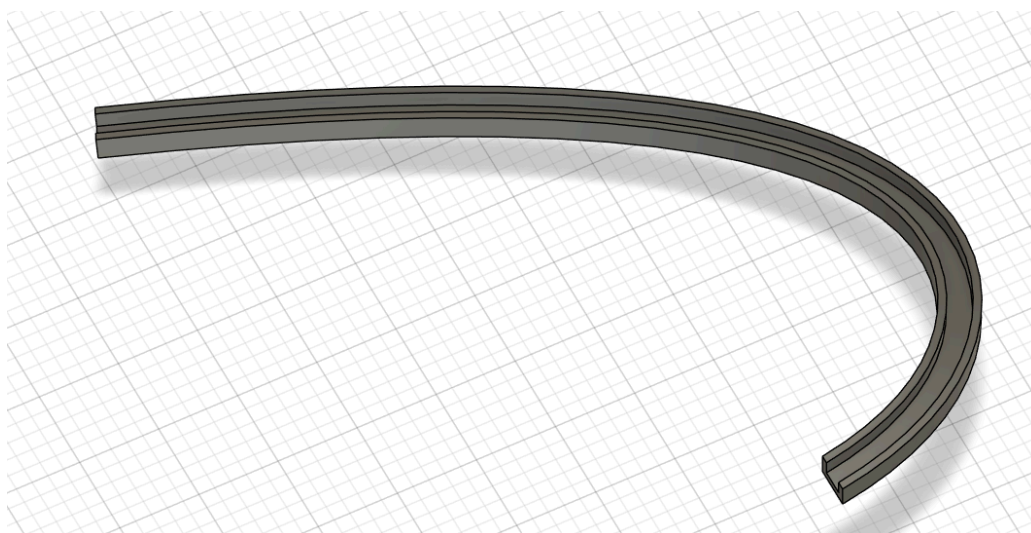
Imatge 50 .Model final del loop. Imatge pròpia



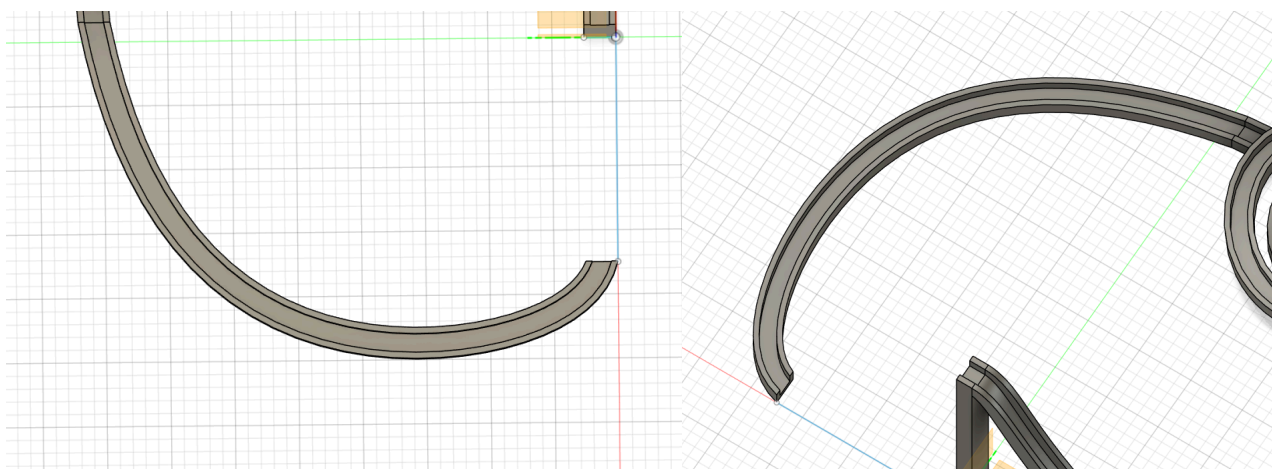
Imatge 51 .Model final del loop. Imatge pròpia

8.5..2.2 Corbes de transició

Les corbes de transició que es troben al meu model es poden dividir en dos: El primer comença just quan s'acaba la pujada connectada al primer loop vertical i la connecta amb els loops horitzontals, mentre que l'altre connecta els loops horitzontals amb el final del recorregut i la pujada mecànica. Aquestes peces es van construir mitjançant l'eina "loft" agafant el perfil resultant de la peça anterior i ajuntant-la amb un altre perfil situat al final de la peça. Tot això amb l'ajuda d'una altra línia "spline" en cada cas.



Imatge 52: .Model final d'una corba de transició.
Imatge pròpia



Imatge 53: .Model final d'una corba de transició.
Imatge pròpia

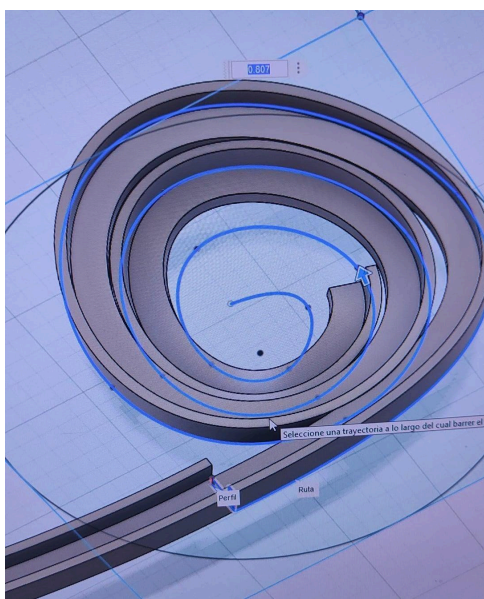
Imatge 54: .Model final d'una corba de transició.
Imatge pròpia

8.5.2.3 Doble loop horitzontal

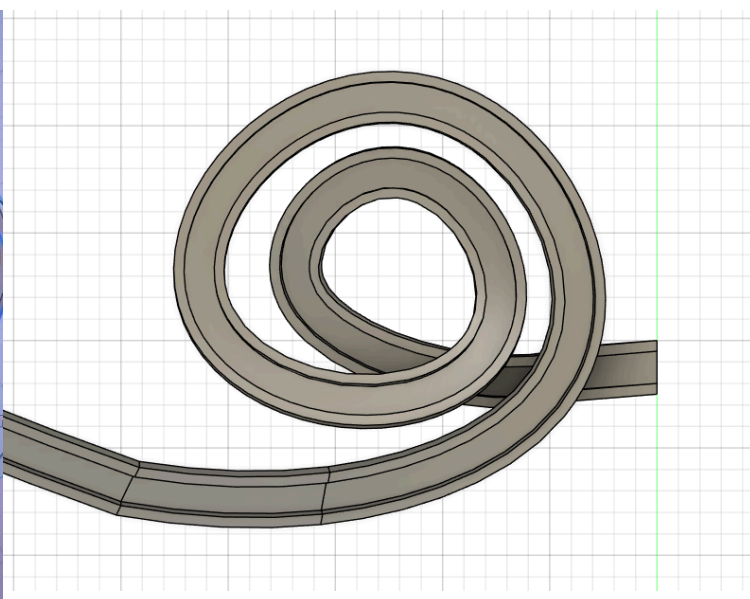
Inicialment, es volia replicar el disseny de “roadbount” però a causa de l'alçada que ens trobem en aquest punt (4 cm) es torna impossible crear un disseny amb corbes tan tancades. A part d'això, per culpa de l'alçada, a l'hora de connectar els perfils, aquests donaven sota la base del model, fet que va obligar a descartar la idea.

Alternativament, vaig optar per un disseny de doble loop horitzontal en el qual el recorregut feia dues voltes i acabava passant per sota d'aquests girs.

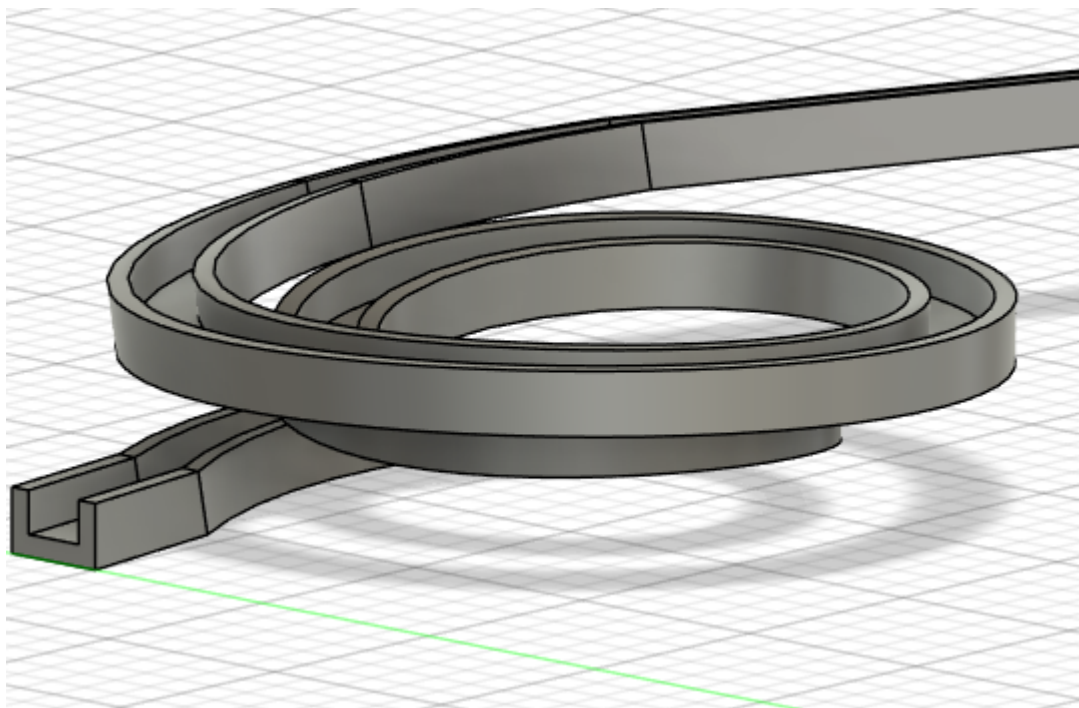
Aquesta peça es va fer mesclant un altra vegada l'eina “escombrat” amb dos “lofts”, un al principi i un altre al final. Tot el recorregut està marcat per un raïl guia a partir d'una línia spline un altra vegada i es van fer 3 perfils per crear aquest segment.



Imatge 55: .Model descartat d'un intent de roundabout
. Imatge pròpia



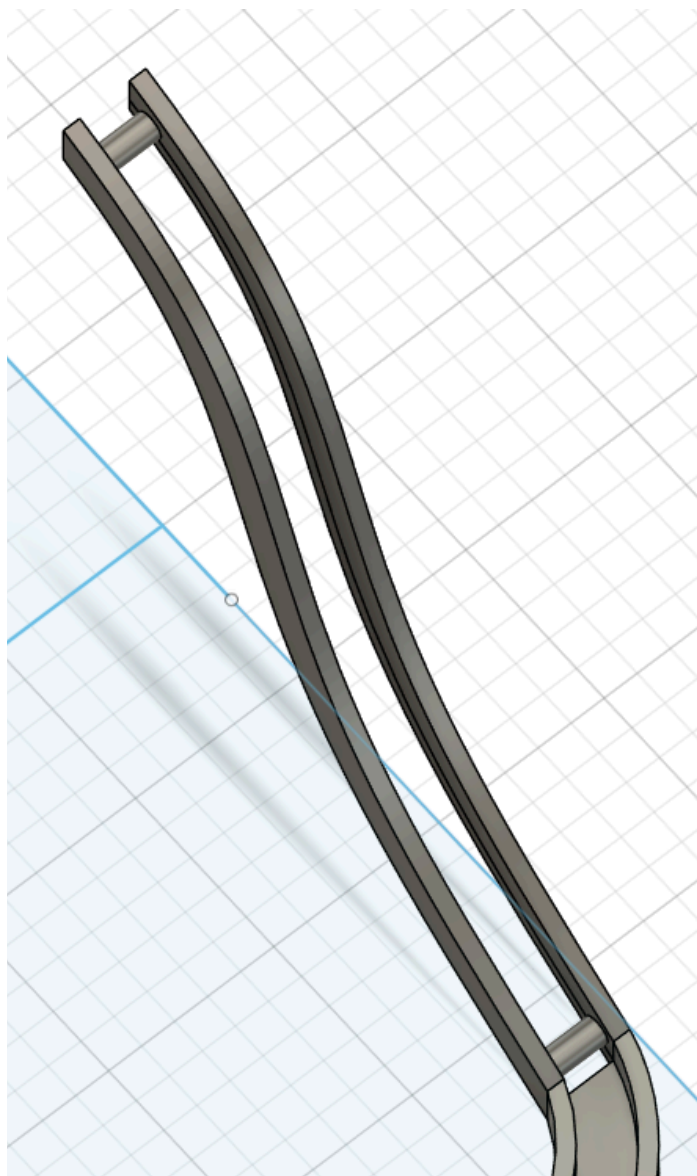
Imatge 56: .Model final del doble loop horitzontal.
Imatge pròpia



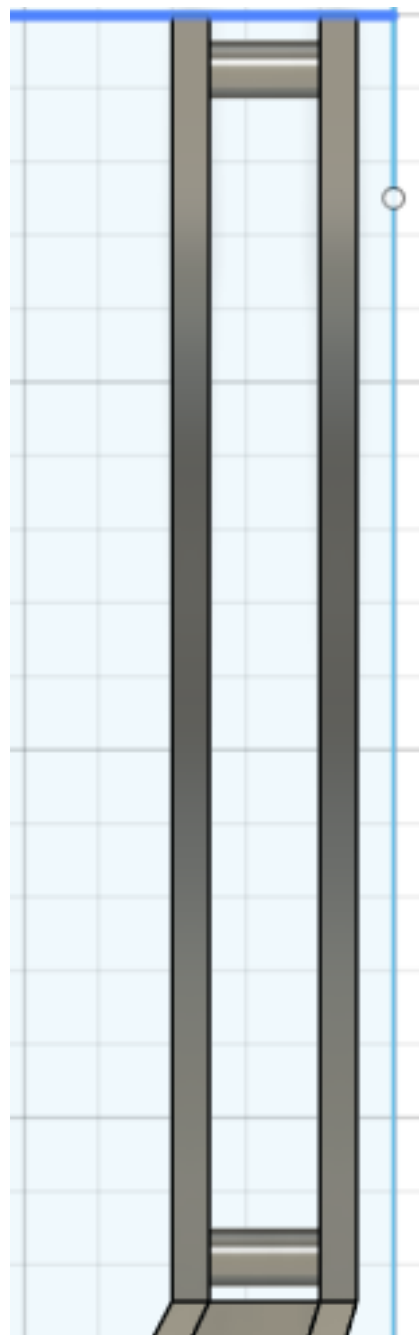
Imatge 57: Model final del doble loop horizontal.

Imatge pròpia

8.5..2.4 Pujada final mecànica



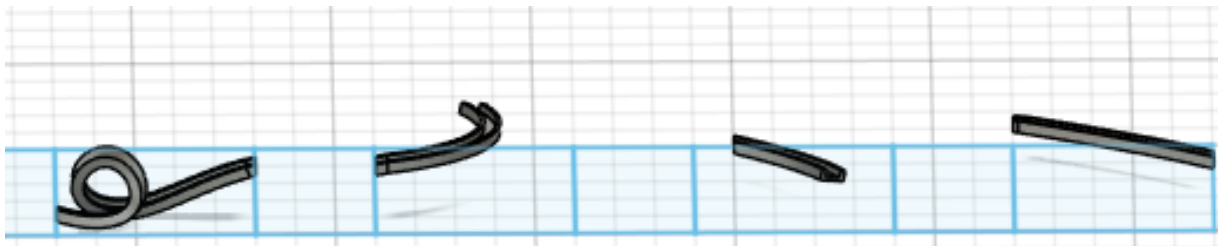
Imatge 58: .Model final del fi del recorregut amb una pujada. Imatge pròpia



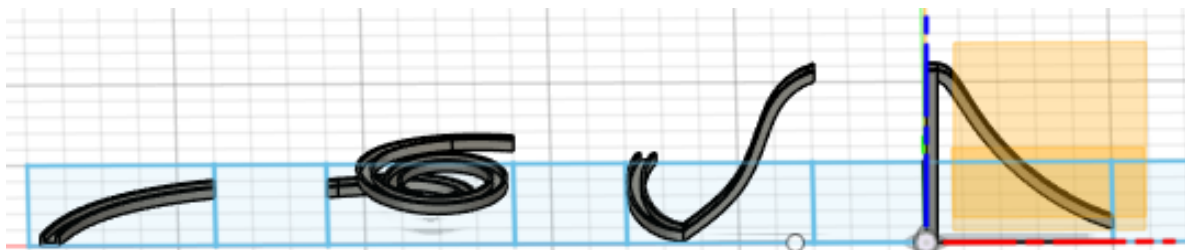
Imatge 59: .Model final del fi del recorregut amb una pujada. Imatge pròpia

Finalment arribem al final del recorregut. Per crear aquesta peça final vaig donar-li profunditat al perfil inicial mitjançant una extrusió i el perfil resultant la vaig connectar-ho amb l'última corba de transició amb un “loft” que segueix una altra línia spline. Tenint en compte la cadena que hauria d'anar connectat amb un motor, vaig buidar completament la part inferior amb una extrusió amb el comandament de tallar de la peça i vaig crear dos cilindres, un al final i l'altre al principi.

Finalment per exportar el model i assegurar els talls de divisió de la peça, vaig separar-les totes en diferents arxius, tots en format STL.



Imatge 60: Model final dividit en parts per a la impressió. Imatge pròpia



Imatge 61: Model final dividit en parts per a la impressió. Imatge pròpia

9. Conclusions

Després d'haver realitzat un estudi sobre les muntanyes russes i els circuits de bales, i d'haver dissenyat el meu model 3D, puc arribar a donar respostes a les hipòtesis inicials del meu treball. Responent a les dues principals: “Es pot replicar una muntanya russa amb loops i girs a una escala en miniatura i que sigui funcional com pot ser un circuit de bales?” i “És un alumne de batxillerat capaç de fer els càlculs d'aquest projecte?”.

El desenvolupament d'aquest projecte ha demostrat que, fent els càlculs adequats, és perfectament possible dissenyar i construir un circuit de bales funcional amb mitjans accessibles. Mitjançant l'ús de programes de disseny 3D gratuïts com Fusion 360, s'ha pogut crear un prototip viable que valida els principis físics i mecànics del circuit. A més, tot el treball s'ha fet de manera gratuïta.

Per una altra banda, els càlculs realitzats per al disseny del looping i la trajectòria de la bala estan basats en conceptes de física que es donen a batxillerat com per exemple la conservació de l'energia, el moviment circular i les forces de fricció. Aplicant la fórmula de la conservació de l'energia mecànica, les equacions del moviment circular i les lleis de Newton han fet possible determinar les mides de tots els elements que calien.

Després de fer el treball, puc concloure que executar aquest projecte no ha estat gens senzill. Inicialment, pensava que seria una tasca relativament senzilla, ja que havia vist un prototip creat prèviament. No obstant això, en aprofundir en el treball, vaig aprendre molt més sobre el seu funcionament. Vaig entendre que, perquè el projectil completi tot el recorregut, calia executar els càlculs adequats per determinar l'altura necessària per obtenir la inèrcia correcta per tornar al punt de partida. Després d'efectuar totes les proves, vaig veure que la solució final seria possible.

Respecte als objectius, estic content de concloure que sí que s'han aconseguit. El principal d'ells: el procés d'elaboració de la maqueta final que contemplava el fet d'assolir un bon nivell de modelatge i els coneixements físics necessaris per fer els càlculs s'han assolit satisfactòriament.

10. Fonts

11.1 Bibliografia

Mangels, William F (1952) *The outdoor amusement industry: from earliest times to the present*.

Estats Units: Nova York: Vintage Press: Disponible online a:

<https://archive.org/details/outdooramusement00mang/page/n9/mode/2up>

12.1 Webgrafia

Imatge 1: (portada) Dibuix d'una muntanya russa [en línia]. Disponible a:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roller_coaster_pictur_dibujo_monta%C3%B1a_rusa.png

- Contribuidors de Viquipèdia . (16 de març de 2025). [Consultat: 20 de juny de 2025] *Muntanya russa*. [en línia] Viquipèdia, L'enciclopèdia Lliure. Disponible a: https://ca.wikipedia.org/wiki/Muntanya_russa
- Cómo funciona una montaña rusa [en línia] Parque Warner Madrid. (sense data). Parque Warner Madrid [Consultat: 20 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.parquewarner.com/blog/como-funciona-montana-rusa-curiosidades>
- Diego. (22 d'abril de 2025). *¿Qué es una montaña rusa? Historia, tipos y cómo funcionan - PortAventura World Blog*. PortAventura World Blog [Consultat: 20 de juny de 2025]. Disponible a: <https://www.portaventuraworld.com/blog/montana-rusa-tipos-como-funcionan>
- *Historia de las montañas rusas*. [Consultat: 4 de setembre de 2025] (sense data). Montañas Rusas. Disponible a: <https://www.xn--montaasrusas-ehb.net/historia-de-las-montanas-rusas>
- Wikipedia contributors. (12 d'agost de 2025). *History of the roller coaster*. [Consultat: 4 de setembre de 2025]. Wikipedia. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_roller_coaster

- The Evolution of Roller Coasters: From Russian Ice Slides to American Steel Marvels - IPWatchdog.com Patents & Intellectual Property Law, 2015.[Consultat: 4 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://ipwatchdog.com/2015/07/27/the-evolution-of-roller-coasters-from-russian-ice-slides-to-american-steel-marvels/id=58894/>

- *The Beginning | Roller coaster history.* (sense data)[Consultat: 4 de setembre de 2025].Disponible a: <https://www.ultimaterollercoaster.com/coasters/history/start/>

- Wikipedia contributors. (1 de desembre del 2023). *Switchback Railway*. [Consultat: 4 de setembre de 2025] Wikipedia.Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Switchback_Railway

- colaboradores de Wikipedia. (19 de novembre del 2018). *Formula Rossa.* [Consultat: 4 de setembre de 2025] Wikipedia, La Enciclopedia Libre. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Formula_Rossa

- DREAM COASTER. (1 de maig de 2020). [Consultat: 4 de setembre de 2025] *[4K] CIENCIA EN LOS PARQUES DE ATRACCIONES CAP 2 FISICA EN LAS MONTAÑAS RUSAS y COMO DISEÑARLAS* [Video]. YouTube. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=VQ0zwYmOPAQ>

- *La montaña rusa con la caída más inclinada del mundo | PACommunity.* [Consultat: 10 de setembre de 2025](sense data) .Disponible a: <https://www.pa-community.com/articulos/la-montana-rusa-con-la-caida-mas-inclinada-del-mundo>

- *Matterhorn Bobsleds | Paseos y Atracciones | Disneyland Park | Disneyland Resort.*[Consultat: 12 de setembre de 2025] (sense data). Disponible a: <https://disneyland.disney.go.com/es-us/attractions/disneyland/matterhorn-bobsleds/>

- colaboradores de Wikipedia. (14 de juny del 2025). *Montaña rusa de madera.* Wikipedia, La Enciclopedia Libre.Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Monta%C3%B1a_rusa_de_madera

- colaboradores de Wikipedia. (23 de maig del 2025). *Shambhala (montaña rusa)*. Wikipedia, [Consultat: 12 d'octubre de 2025] La Enciclopedia Libre. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Shambhala_\(monta%C3%B1a_rusa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Shambhala_(monta%C3%B1a_rusa))
- colaboradores de Wikipedia. (sense data). [Consultat: 12 d'octubre de 2025] *Anexo:Elementos de una montaña rusa - Wikipedia, la enciclopedia libre*. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Elementos_de_una_monta%C3%B1a_rusa
- YasminaCodes. (29 de maig de 2021). [Consultat: 12 d'octubre de 2025] *Como se programan las montañas rusas* [Video]. YouTube. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=o-PA32mBdhw>
- Wikipedia contributors. (14 de febrer del 2025). *Lift hill*. [Consultat: 12 d'octubre de 2025] Wikipedia. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Lift_hill
- colaboradores de Wikipedia. (15 de maig del 2025). *Red Force*. [Consultat: 11 d'octubre de 2025] Wikipedia, La Enciclopedia Libre. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Red_Force
- Wiki, C. T. R. C. (sense data). *Hydraulic*. Roller Coaster Wiki. [Consultat: 16 d'octubre de 2025] Disponible a: <https://rollercoaster.fandom.com/wiki/Hydraulic>
- *Six Flags Mexico - Superman Krypton Coaster | Ride | Six Flags Mexico* [Consultat: 12 d'octubre de 2025]. (sense data). Disponible a: <https://www.sixflags.com/mexico/attractions/jr-roller-coaster>
- Wikipedia contributors. (3 d'octubre del 2023). *Roller coaster wheel assembly*. [Consultat: 17 d'octubre de 2025] Wikipedia. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Roller_coaster_wheel_assembly
- *Roller Coaster DataBase*. (11 de juny del 2024). [Consultat: 17 d'octubre de 2025] Rcdb. Disponible a: <https://rcdb.com/>

- Wikipedia contributors. (4 de juny del 2025) [Consultat: 17 d'octubre de 2025]. *Brake run*. Wikipedia. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Brake_run
- *Sistemas de Frenado*. (sense data). [Consultat: 17 d'octubre de 2025] Físicatracción. Disponible a: <https://fisicatraccion.weebly.com/sistemas-de-frenado.html>
- colaboradores de Wikipedia. (30 d'abril del 2025). *Pista de canicas*. [Consultat: 6 d'octubre de 2025] Wikipedia, La Enciclopedia Libre. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Pista_de_canicas
- *Bambu Lab X1C | Impresora 3D de fibra de carbono | Bambu Lab*. (sense data). [Consultat: 6 de novembre de 2025] Disponible a: <https://bambulab.com/es/x1>

13. Agraïments

La realització d'aquest treball ha estat un procés llarg i laboriós, que no hauria estat possible sense les persones que m'han donat suport i que m'han ajudat al llarg de la seva realització.

Primer de tot vull agrair al meu tutor de recerca, Jaime Morcillo, per la seva dedicació i ajuda

Durant tot el procés. Agraeixo especialment els seus consells i les seves idees i aportacions, que han fet que aquest treball hagi sigut una mica més fàcil. Ha estat la primera persona que m'ha ajudat sempre em trobava un problema, i també la primera que jo acudia. Per intentar pensar en solucions. Sense la seva ajuda aquest treball no hauria arribat a res.

A més, vull agrair també als meus companys que m'han ajudat destacant a Teerath Lal, Jordi Hong i Juan Manuel per ajudar-me a ajuntar les impressions 3D i per haver donat suport emocional.

Finalment, vull donar les gràcies a tota la meua família i amics, per la seva motivació constant i el seu interès per aquest tema. Especialment, al meu germà, Chang Kai per la seva ajuda al llarg del procediment i els seus consells a partir de la seva experiència. <