



**FACULTAT
DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA**

UVIC | UVIC·UCC

Treball de Fi de Grau

Disseny i fabricació d'un telescopi amb control i visualització remota

Gerard Vallverdú Mercadé

Grau en Enginyeria Mecatrònica

Tutors: Ramón Jerez Mesa i David Reifs Jiménez

Vic, juny de 2019

Agraïments

Agraeixo tota la confiança i suport dels meus tutors Ramón Jiménez i David Reifs, on la seva ajuda ha estat clau en molt punts on jo sol no veia la solució.

Aquest projecte va dedicat a tota la meva família, sempre heu confiat en mi i m'heu encoratjat a fer realitat les meves il·lusions. Una part especial és per la meva xicota, Laura, quan jo només veig un sol arbre ella sempre hi veu el bosc i amb un somriure d'esperança.

Resum Treball Final de Grau

Grau en Enginyeria Mecatrònica

Paraules clau: reductor epicicloidal, impressió 3D, Node-RED, Internet de les Coses

Resum:

Fa més de quatre segles va néixer un invent que ens provocaria redefinir el nostre lloc a l'Univers. Era conegut com l'instrument més diabòlic de la història, ja que desafiava la noció del món on nosaltres érem el centre de la creació. Es tractava del telescopi, un petit tub amb dos vidres als extrems que entre 1608 i 1609 ho canviaria tot.

L'objectiu principal d'aquest projecte és dissenyar i fabricar un telescopi mecatrònic, basat en la fabricació additiva, el control i la visualització remota a través de l'ús d'Internet de les Coses (*IoT*).

Tota fabricació de màquines exigeix entendre el producte a obtenir. En aquest cas s'haurà de comprendre els sistemes de coordenades celestes i dividir el projecte en tres parts diferenciades tot i que complementades entre elles: la visió, el moviment i l'equilibri. Parlem d'un tub format per un sol mirall i una càmera al seu interior, una muntura motoritzada amb un sistema reductor i un trípode.

El projecte s'estructura amb el disseny d'un prototip on es tracten els aspectes mecànics, la sensòrica, l'electrònica i la comunicació. Un apartat de proves funcionals justifica l'evolució del disseny inicial, la posada en pràctica de la fabricació, el muntatge i els resultats obtinguts amb les conseqüents conclusions.

Es pot concloure que és possible fabricar un telescopi funcional amb impressió 3D i equipar amb controladors que permetin la utilització remota per obtenir imatges sense haver de mirar a través del tub.

Degree Final Project Abstract

Mechatronics Engineering Degree

Keywords: : epicyclic reducer, 3D printing, Node-RED, Internet of Things

Abstract:

More than four centuries ago an invention was born that would allow us to redefine our place in the Universe. It was known as the most diabolical instrument in history, as it challenged the notion of the world where we were the center of creation. It was a telescope, a small tube with two glasses at the ends that would change everything between 1608 and 1609.

The main objective of this project is to design and manufacture a mechatronic telescope, based on additive manufacturing, control and remote visualization through the Internet of Things (IoT).

All manufacturing of machines requires understanding the product to be obtained, in this case we must understand the systems of celestial coordinates and divide the project into three different parts, although complemented by one another: vision, movement and balance. We speak of a tube made up of a single mirror and a camera inside, a motorized mount with a reducing system and a tripod.

The project is structured with the design of a prototype that deals with the mechanical, sensory, electronic and communication aspects. A section of functional tests justifies the evolution of the initial design, the putting into practice of the manufacture, the assembly and the results obtained with the consequent conclusions.

It can be concluded that it is possible to manufacture a functional telescope with 3D printing and equip with drivers that allow remote use to obtain images without having to look through the tube.

Índex

Índex de figures	5
Índex de taules	6
Índex d'equacions.....	7
Capítol 1. Introducció.....	8
Estat de l'art	8
Objectius	13
Abast.....	13
Planificació	14
Capítol 2. Marc conceptual.....	14
Coordenades celestes utilitzades	14
Tipus de telescopi fabricat i requeriments a tenir en compte	16
Programa planetari utilitzat	17
Capítol 3. Disseny del prototip.....	19
Disseny i càlculs mecànics	20
Tub	20
Conjunt mirall	20
Aranya	21
Suport del tub	25
Muntura	27
Justificació dels motors dels eixos	27
Reductor epicicloidal	30
Suport de la muntura.....	36
Disseny de la comunicació	37
Control del telescopi amb interfície d'usuari IoT	38
Control del telescopi mitjançant el software planetari Stellarium.....	43
Comprensió del codi del servidor TCP/IP de Stellarium	44
Modificació del simulador de connexió TCP/IP amb incorporació de MQTT.....	46
Posició de referència inicial del telescopi.....	48
Posicionament del telescopi amb les coordenades enviades des de Stellarium	49

Mètode de comptar els passos del motor per posicionar el telescopi	51
Disseny electrònic	53
Controladors dels motors	53
Sensors	55
Caixa elèctrica	58
Capítol 4. Conclusions	59
Capítol 5. Possibles millores	60
Capítol 7. Bibliografia	61

Índex de figures

Figura 1. Parts bàsiques d'un telescopi	8
Figura 2. Telescopi refractor	9
Figura 3. Aberració cromàtica en telescopis refractors	9
Figura 4. Telescopi reflector	10
Figura 5. Telescopi catadiòptric	10
Figura 6. Muntura altazimutal	11
Figura 7. Muntura equatorial	12
Figura 8. Pol Nord i pol Sud celeste	15
Figura 9. Requeriments de disseny de la muntura escollida	16
Figura 10. Captura realitzada des de Stellarium amb les coordenades equatorials	17
Figura 11. Captura de Stellarium, configuració de la nostra ubicació	18
Figura 12. Captura de Stellarium, tipus de connexions disponibles	18
Figura 13. Disseny propi del telescopi realitzat amb PTC Creo 5	19
Figura 14. Tub del telescopi	20
Figura 15. Conjunt mirall	21
Figura 16. Aranya	22
Figura 17. Relació de transmissió mecanisme pinyó-cremallera de la càmera	22
Figura 18. Distància entre centres dels engranatges de l'aranya	23
Figura 19. Secció de l'Aranya. Distància entre centres Z3 i cremallera	24

Figura 20. Suport del tub del telescopi.....	26
Figura 21. Diagrama del sòlid lliure amb les càrregues del conjunt tub	26
Figura 22. Càlcul de la posició d'equilibri del contrapès	28
Figura 23. Gràfica del parell del motor segons velocitat mesurada en polsos per segon i a mitjos passos	30
Figura 24. Un dels mòduls del reductor planetari dissenyat per moure els eixos.....	31
Figura 25. Mètode seguit per dissenyar el reductor epicicloidal	32
Figura 26. Mètode seguit pel disseny de tots els engranatges del reductor	33
Figura 27. Disseny d'una dent de l'engranatge planeta del reductor epicicloidal	33
Figura 28. Reductor epicicloidal amb una reducció de 1024:1	34
Figura 29. Detall de la unió entre els mòduls reductors epicicloidal.	34
Figura 30. Conjunt eix reductor amb detall de la reducció entre mòduls epicicloidal i pinça de subjecció.....	35
Figura 31. Suport de la muntura amb 2 graus de llibertat.....	36
Figura 32. Esquema de la comunicació en estrella del protocol MQTT	37
Figura 33. Clients, broker i màster del projecte.....	38
Figura 34. Fragment de la programació amb Node-RED del projecte.....	38
Figura 35. Interfície d'usuari amb plataforma IoT del Node-RED dashboard	39
Figura 36. Esquema de comunicació quan l'usuari prem el botó d'aturada d'un motor	41
Figura 37. Fragment de la funció programada a l'ESP32 n°1 per posicionar el "Zero"	42
Figura 38. Sensor hall i imant de neodimi que permeten posicionar el "Zero" dels eixos	42
Figura 39. Connexió a Internet dels dispositius amb l'ordinador com a punt d'enllaç	43
Figura 40. Configuració de la connexió de Stellarium mitjançant TCP/IP	44
Figura 41. Node-RED, nodes per rebre les coordenades des de Stellarium, visualitzar-les i enviar-les per MQTT als motors.....	47
Figura 42. Esquema de comunicació entre Stellarium, RaspberryPi, Servidor, Node-RED, ESP-32 i els motors.....	48
Figura 43. Posicionament de referència inicial del telescopi	49

Índex de taules

Taula 1. Planificació general del Treball de Fi de Grau	14
---	----

Taula 2. Planificació general del Treball de Fi de Grau	14
Taula 3. Esquema bàsic d'un missatge client (Stellarium)→Servidor (programa Python a la Raspberry)	45
Taula 4. Característiques principals del controlador motor DRV8825	53

Índex d'equacions

Equació 1. Raó focal.

Equació 2. Càlcul del número de dents d'un engranatge

Equació 3. Càlcul dels passos a programar el motor perquè la cremallera recorri 2mm de forma suau.

Equació 4. Càlcul de la posició del suport del conjunt tub

Equació 5. Càlcul del parell necessari per moure l'eix DEC

Equació 6. Càlcul de la velocitat de rotació de la Terra

Equació 7. Càlcul de la reducció a partir de la relació de transmissió

Equació 8. Càlcul de la reducció total d'un eix del telescopi

Equació 9. Segona iteració per calcular la velocitat angular de sortida en rpm

Equació 10. Comparació del parell torçor necessari del telescopi amb el parell torçor obtingut amb el reductor

Equació 11. Càlcul de la posició final d'un eix del telescopi pel mètode de comptar passor del motor
Equació 11. Càlcul de la posició final d'un eix del telescopi pel mètode de comptar passor del motor

Equació 12. Càlcul del número de passos del motoreductor per contrarrestar la velocitat de la Terra

Equació 13. Càlcul de la tensió de referència pel ajustatge del controlador del motor

Capítol 1. Introducció

Estat de l'art

Un telescopi és un instrument òptic que recull certa quantitat de llum i la concentra en un punt determinat. Estan formats principalment per dues parts: el tub i la muntura. (Figura 1).



Figura 1. Parts bàsiques d'un telescopi¹

El tub està format per l'objectiu i l'ocular. El primer és el que s'orienta cap al cel i per tal de veure'n les imatges s'utilitza l'ocular, que proporciona els diferents augments i permet que l'ull apreciï tots els detalls de la imatge que es forma a l'objectiu.

La muntura, a més d'aguantar el tub, fa possible els moviments suaus i precisos per orientar el telescopi. És per això que una bona muntura pot costar més que el tub.

Existeixen tres tipus de telescopis: refractors, reflectors i catadiòptrics.

Refractors: és el model més antic, on l'objectiu està format per lents. S'anomenen així perquè la formació de la imatge es basa en la desviació dels raigs de llum quan travessa la lent principal fins a concentrar-la en un punt dins del tub. Finalment, la lent de l'ocular rectifica la llum i és on podem observar la imatge. (Figura 2).

¹ Meade Telescopes Telescopes, Solar Telescopes, Binoculars, Spotting Scopes. (s.f.-b). Visitat el 15 novembre, 2018, de <https://www.meade.com/telescopes.html>

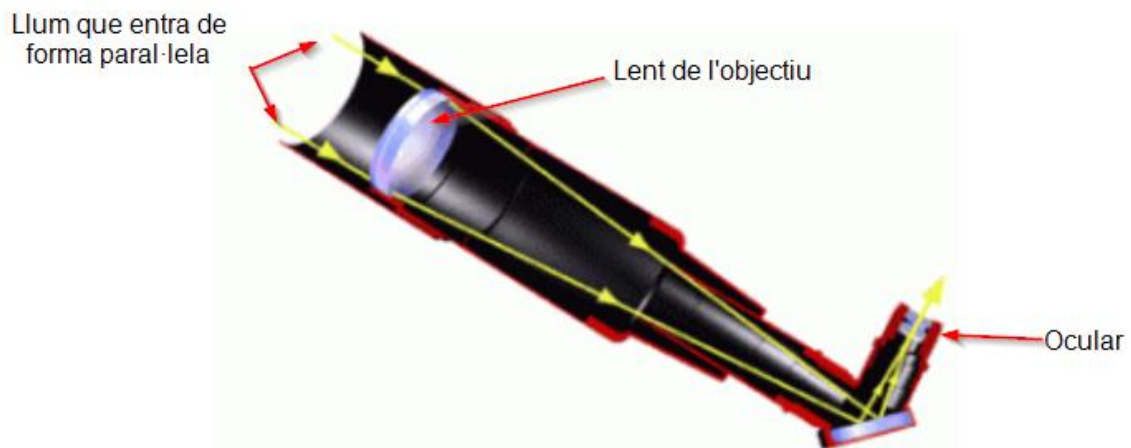


Figura 2. Telescopi refractor²

El seu principal avantatge és que tenen un disseny simple i les seves peces estan fixades, per tant, és fàcil de mantenir i és difícil que les es desalineï. És útil per l'observació d'objectes brillants, en canvi, no tan apte per objectes de l'espai profund. El seu desavantatge és que poden sofrir aberració cromàtica i són complicats de construir. (Figura 3).

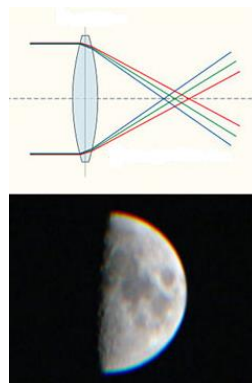


Figura 3. Aberració cromàtica en telescopis refractors²

Reflectors: és del tipus de telescopi que s'ha basat aquest projecte. Utilitzen un joc de miralls per concentrar la llum. El més utilitzat i conegut és el de tipus *newtonià*. La llum entra per l'obertura del tub, arriba al mirall primari (còncav) i la concentra en un punt. El mirall secundari, que es troba en aquest punt, desvia la imatge cap a l'ocular. L'ocular "rectifica" la imatge i la projecta. (Figura 4).

2 Types of Telescopes | Tutorial Categories | Starizona. (s.f.-b). Visitat el 15 novembre, 2018, de https://starizona.com/tutorial_categories/types-of-telescopes/

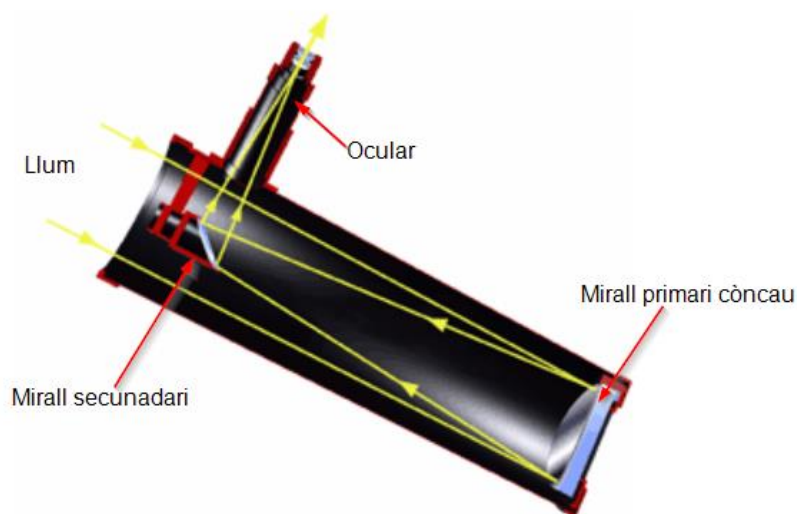


Figura 4. Telescopi reflector²

Tenen molt menys distorsions que els refractors i són molt fàcils de corregir, només s'ha de mantenir els miralls nets i ben alineats. És útil tant per l'observació dels objectes més brillants com els de l'espai profund. En canvi, no tenen tanta resolució degut a l'obstrucció del mirall secundari. Els miralls es desalineen fàcilment tot i que són fàcils de tornar a col·limar.

Catadiòptrics: és una combinació dels dos anteriors, ja que disposa tant de miralls com lents. La llum passa per una lent correctora just quan entra al tub, és captada per un mirall primari, que la dirigeix cap a un mirall secundari situat al centre de la lent, aquest mirall secundari torna a dirigir la llum cap al centre del mirall primari, on hi ha un forat pel qual la llum arribarà a l'ocular i es formarà la imatge. (Figura 5).

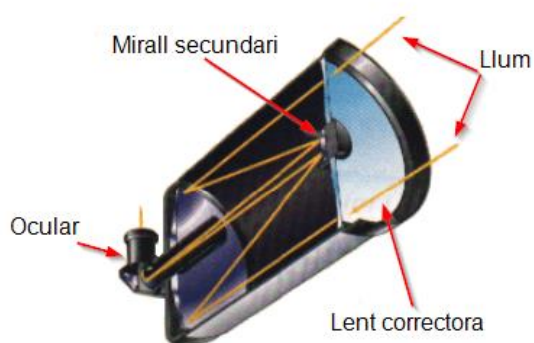


Figura 5. Telescopi catadiòptic²

És valorat per l'observació del cel profund i molt utilitzat per astrofotografia, té un disseny molt compacte, avantatge que el fa fàcil de transportar. En canvi, són molt més cars que es reflectors del mateix diàmetre.

En aquest projecte ens centrarem en utilitzar un telescopi reflector, però només de forma parcial, ja que es prescindeix del mirall secundari i de l'ocular. Únicament incorpora un mirall primari i al lloc del

mirall secundari es col·loca una petita càmera,. Aquesta tècnica és utilitzada en astrofotografia i es coneix com focus primari³, on és imprescindible retirar la lent de la càmera.

Podem distingir dos tipus de muntura, la muntura altazimutal i la equatorial.

Muntura altazimutal: disposa de dos eixos perpendiculars (horitzontal i vertical). El moviment horitzontal correspon a l'azimut i al vertical a l'alçada o elevació. Ambdós mesurats en graus de 0° a 360°. Aquests moviments són mesurats respecte l'observador que té posició 0° azimut i 0° d'alçada. (Figura 6).



Figura 6. Muntura altazimutal⁴

És la més senzilla de fabricar, però no és gens apta per astrofotografia ja que requereix “perseguir” els objectes constantment ja que surten ràpidament del camp visual de l'ocular.

Muntura equatorial: també disposa de dos eixos giratoris perpendiculars entre ells i que poden girar 360°, coneguts com eix d'ascensió recta (AR) i eix de declinació (DEC). L'eix d'ascensió recta és paral·lel al de rotació de la Terra i ha d'apuntar cap pol nord celeste, això permet compensar el moviment de rotació del planeta movent només l'eix de declinació. (Figura 7).

3 Maulana, F., Soegijoko, W., & Yamani, A. (2016). Utilising Raspberry Pi as a cheap and easy do it yourself streaming device for astronomy. *Journal Of Physics: Conference Series*, 771, 012025. doi: 10.1088/1742-6596/771/1/012025

4 Monturas para telescopios. (2019, 21 febrer). Visitat el 20 novembre, 2018, de <https://astroperso.org/2019/02/21/monturas-para-telescopios/>

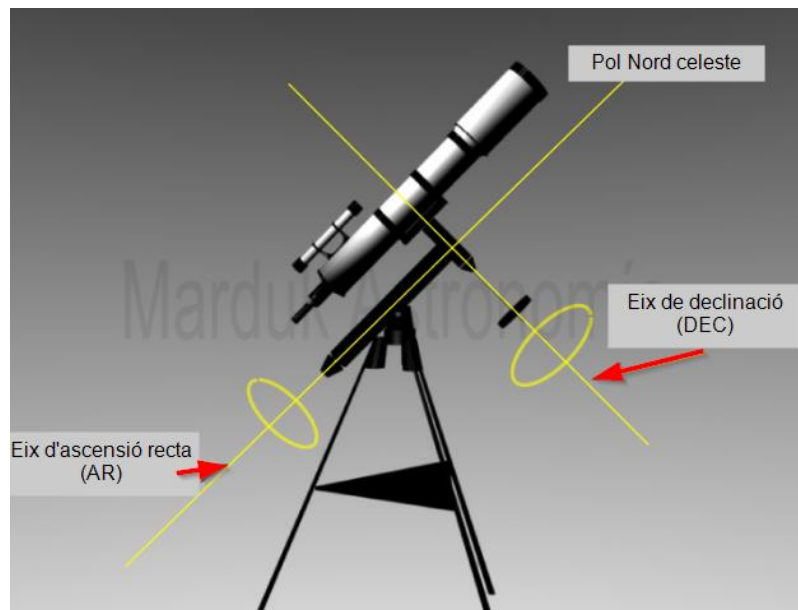


Figura 71. Muntura equatorial⁵

És el tipus de muntura més utilitzat per astrofotografia, perquè permet seguir un astre amb un eix fixe i l'altre a velocitat constant igual a la rotació de la Terra. És per això que en aquest projecte de visualització remota s'ha utilitzat aquesta muntura. Tot i això, solen ser muntures d'elevat preu i el seu gran pes necessita ser equilibrat amb contrapesos. Sol fer respecte als principiants en astronomia, ja que els seus moviments no són intuïtius i són complicats de dissenyar i fabricar.

Tots aquests aspectes s'han tingut en compte en aquest projecte i el repte de fabricar-lo amb impressió 3D, motoritzada i un control sense fils mitjançant plataforma d'Internet de les Coses encara ho ha fet un objectiu més important i innovador.

5 Imatge extreta i modificada de: Tipos de Monturas para un telescopio - AstroAficion. (2018, 28 octubre). Visitat el 20 novembre, 2018, de <https://astroaficion.com/2011/03/04/tipos-de-monturas/>

Objectius

- Dissenyar amb software paramètric un telescopi funcional format per un sol mirall principal, una càmera receptora de la imatge, un enfocament i una muntura equatorial motoritzats i un trípode que subjectarà i estabilitzarà tot el conjunt.
- Comprendre el funcionament de les coordenades equatorials.
- Fabricar en impressió 3D un sistema reductor basat en engranatges epicicloïdals.
- Comandament sense fils del telescopi format per una comunicació IoT⁶, entre un microprocessador (màster) i microcontroladors (clients) a través d'un *bróker*⁷ (Node-RED) i protocol MQTT.
- Comunicació amb un software planetari gratuït amb protocol LX200.
- Utilitzar un mètode de posicionament del telescopi que permeti referenciar una posició de "zero" respecte al software planetari utilitzat.
- Realitzar una planificació ajustada al termini d'entrega del projecte, sent capaç de delimitar un abast realista.

Abast

Aquest projecte pretén demostrar que és possible el disseny propi d'un telescopi mecatrònic, la seva fabricació a partir de polímers i un control sense fils. Degut al elevat cost d'un producte d'aquestes característiques al mercat, és de gran motivació poder aplicar els coneixements obtinguts durant el grau per "replicar-ne" un el més semblant possible.

Comprendre els sistemes de coordenades, estudiar el funcionament dels mecanismes actuals i de comunicació són estudis previs clau per tal de poder prendre decisions justificades que derivaran en assolir els objectius marcats.

Les limitacions del telescopi són el calibratge previ que es farà de forma manual, al disposar la càmera a l'interior del tub implica no disposar d'elements d'ampliació de les imatges obtingues. El software planetari està instal·lat a l'ordinador, que es comunica amb un microcontrolador (ESP32) a través del port sèrie, no es fa de forma remota degut a la complexitat d'interpretació del protocol LX200 de comunicació de dades. Aquestes dades són enviades per wifi a la Raspberry Pi (màster) per tal de donar les ordres corresponents als seus clients (ESP32) i aquests als motors.

⁶ *Internet of Things*, conegut com Internet de les Coses.

⁷ Programa que ens permet comunicar sistemes de llenguatge diferents.

Planificació

A continuació es mostra de manera general una planificació del projecte. (Taula 1).

	1	2	3	4	5	6	6,5
	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
Disseny general							
Disseny i fabricació							
Compres i Fabricació							
Proves específiques							
Comunicació							
Proves generals							
Memòria							
Presentació							

Taula 2. Planificació general del Treball de Fi de Grau

Capítol 2. Marc conceptual

Coordenades celestes utilitzades

Les coordenades equatorials és el sistema de referència utilitzat. És molt important entendre correctament el seu funcionament, per tal de prendre decisions encertades en el posterior disseny del projecte. Aquest es basa en la posició de la Terra respecte de les estrelles. El gran avantatge que té és que les coordenades no depenen de la posició de l'observador sobre la Terra, és a dir, són les mateixes per algú que està a Austràlia que per algú que està a Vic.

Per tal de definir ubicacions terrestres utilitzem la longitud i la latitud, també dividim els continents en països. En astronomia fem quelcom semblant i també dividim el cel en regions; són les constel·lacions. En el sistema de coordenades equatorials s'utilitza la declinació (DEC) i l'ascensió recta (AR) per definir les ubicacions dels astres. Per comprendre la seva estructura hem d'imaginar-nos que la Terra és el centre de l'Univers i tot gira al nostre voltant, que el cel és una esfera i tots els

objectes astronòmics estan enganxats a ella. Si prolonguem l'eix de rotació de la Terra per ambdós costats del pol Nord i pol Sud fins que travessem aquesta esfera imaginària del cel obtindrem dos punts de contacte, que són el pol celeste Nord i pol celeste Sud. És com si aquesta esfera celesta girés al voltant d'aquests dos punts. Si ara estirem la línia de l'equador de la Terra i l'enganxem a l'esfera celeste tindrem traçat l'equador celeste, el qual divideix el cel en dues meitats; l'hemisferi Nord i l'hemisferi Sud. (Figura 8).

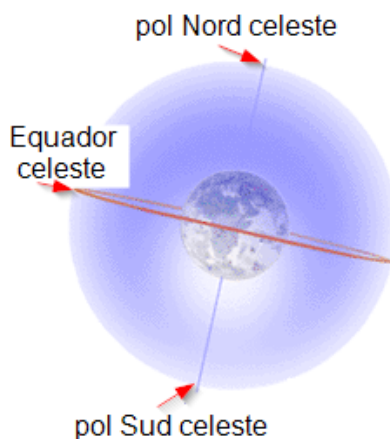


Figura 8. Pol Nord i pol Sud celeste

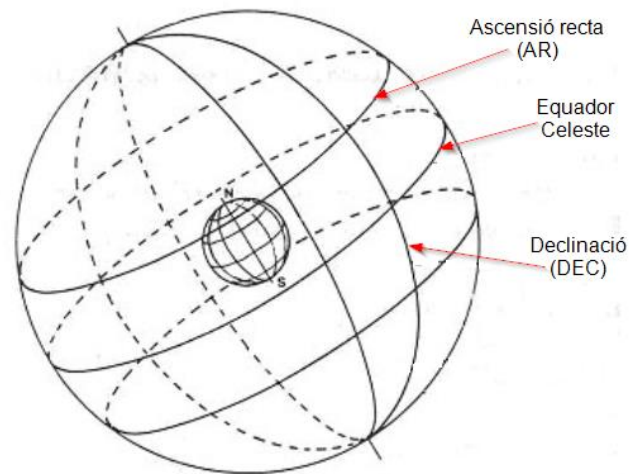
Si ara dibuixem a l'esfera celeste línies concèntriques paral·leles a l'equador fins arribar als dos pols obtenim les declinacions⁸. La declinació d'un astre es mesura en graus, minuts i segons ($^{\circ}$, $'$, $''$) i ens indica la seva distància angular respecte l'Equador Celeste. El seu rang va de -90° a $+90^{\circ}$, per exemple, la declinació d'una estrella que està sobre l'Equador Celeste és 0° , si està sobre el Pol Nord Celeste pren per valor 90° i si està just al Pol Sud serien -90° . Els astres situats al Sud de l'Equador tenen valors negatius i els del Nord positius.

Ara tracem línies des del Pol Nord Celeste fins al Sud, aquestes corresponen a l'ascensió recta⁹ i mesuren la posició dels objectes celestes cap a l'Est o Oest. Les seves unitats són hores, minuts i segons, es mesura cap a l'Est sobre l'Equador Celeste i pren valors de 0 a 24 hores, on una hora equival a 15 graus. Un astre situat a 0 hores implica que està situat al Punt Vernal¹⁰ i correspon al punt de l'Equador Celeste on el Sol es troba cada any durant el moment del equinocci de primavera.

⁸ La declinació es denomina amb la lletra grega δ i sol aparèixer abreujada amb les sigles DEC

⁹ L'ascensió recta es denomina amb la lletra grega α i sol aparèixer abreujada amb les sigles AR

¹⁰ El Punt Vernal es denomina amb la lletra grega γ



Tant la declinació com l'ascensió recta són mesures angulars i no de temps.

Tipus de telescopi fabricat i requeriments a tenir en compte

La referència per aquest projecte és el telescopi de tipus reflector amb muntura equatorial motoritzada.

Aquest tipus de muntura implica tenir en compte els següents requeriments de disseny. (Figura 9).

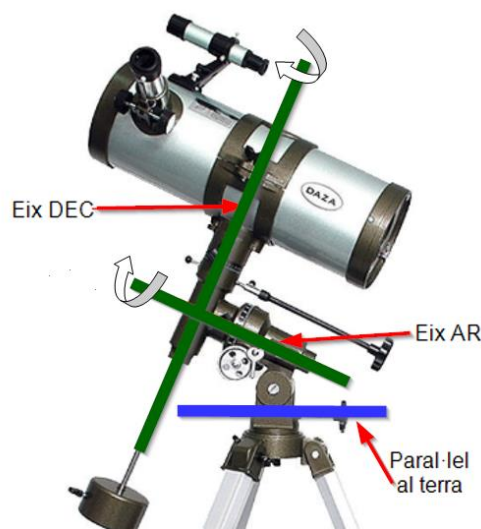


Figura 92. Requeriments de disseny de la muntura escollida

1. La base de la muntura ha d'estar paral·lela al terra i poder rotar 360° lliurement.
2. És necessari encarar tota la muntura en direcció al Nord geogràfic.
3. Els dos eixos han d'estar perpendiculars entre sí i poder-los rotar 360° amb precisió.
4. Conèixer les coordenades geogràfiques d'on es troba el telescopi, concretament la latitud.
5. L'eix d'ascensió recta s'ha de poder graduar amb una inclinació igual a la latitud on es trobi el telescopi.

6. Disposar d'un sistema que permeti garantir una posició de "zero" inicial en els dos eixos. Aquesta posició implica tenir l'eix de declinació en una posició tal que el tub estigui paral·lel a l'eix d'ascensió recta. El grau de precisió d'aquest calibratge previ implicarà poder fer un bon seguiment dels astres.

Programa planetari utilitzat

Per tal de conèixer les coordenades celestes equatorials s'utilitza *Stellarium*¹¹, un planetari virtual de codi obert gratuït instal·lat a l'ordinador. Aquest programa permet visualitzar el cel en 3D, tal i com es pot veure a simple vista o simulant la visió amb un telescopi. Un cop configurat, mostra les estrelles, planetes, satèl·lits (també els artificials) que podem observar segons la nostra localització i a temps real. També hi trobem els punts cardinals i les línies artificials de les coordenades equatorials. Es pot clicar sobre qualsevol astre i conèixer les seves coordenades, també on es trobarà al llarg del temps futur o inclús passat. (Figura 10).



Figura 10. Captura realitzada des de Stellarium amb les coordenades equatorials

Aquestes dades ens les poden proporcionar varis softwares planetaris. Els més coneguts són: Cartes du Ciel¹², Celestia¹³, Google Sky¹⁴, MPL3D Solar System¹⁵, Kstars¹⁶, entre d'altres. Els principals motius pels quals s'ha escollit Stellarium és perquè permet vincular l'hora i la posició geogràfica, per tant, no ens caldrà tenir un mòdul GPS instal·lat al telescopi i que es comuniqui amb el software contínuament. El programa ens mostra la posició dels astres al cel a temps real i segons la nostra localització. (Figura 11).

¹¹ Stellarium Astronomy Software. (Consultat el 15/05/2019), de <https://stellarium.org/es/>

¹² Skychart. (Consultat el 03/01/2019), de <https://www.ap-i.net/skychart/en/start>

¹³ Celestia. (Consultat el 03/01/2019) de <https://celestia.space/>

¹⁴ Google Sky. (Consultat el 03/01/2019), de http://www.google.com/intl/es_es/sky/

¹⁵ MPL3D Solar System. (Consultat el 04/01/2019), de <http://www.mpl3d.com/>

¹⁶ Kstars. (Consultat el 04/01/2019), de <https://edu.kde.org/kstars/>



Figura 11.. Captura de Stellarium, configuració de la nostra ubicació

El segon motiu pel qual s'ha escollit aquest software és perquè permet una comunicació basada amb el protocol LX200. La majoria de programes planetaris només permeten comunicacions amb muntures comercialitzades mitjançant els seus respectius drivers i no podríem realitzar-hi una comunicació personalitzada IoT. En canvi, Stellarium permet efectuar el paper de client i intercanviar dades com a client-servidor¹⁷ gràcies a aquest protocol. És a dir, un cop comprès el protocol LX200 es podrà programar un servidor que sigui capaç de rebre les coordenades que desitgem del software i també enviar-li les nostres, realitzant el paper de client-servidor i servidor-client.

Una altra raó important és la possibilitat d'intercanviar dades mitjançant un port sèrie¹⁸ o per TCP¹⁹. Aquesta última ens permetrà comunicar-nos remotament amb Stellarium, però en cas de no aconseguir-ho sempre podrem optar per la comunicació per port sèrie mitjançant un cable connectat al port USB de l'ordinador i a un dels nostres microcontroladors del telescopi. (Figura12).

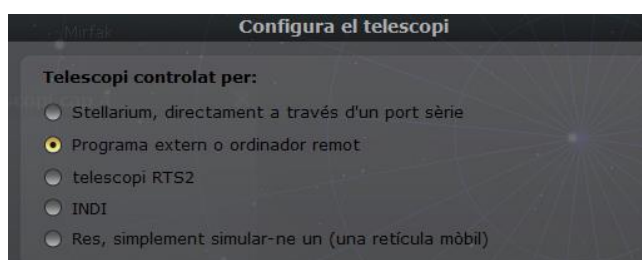


Figura 12. Captura de Stellarium, tipus de connexions disponibles

¹⁷ El client correspon a la màquina que sol·licita la connexió, en aquest cas Stellarium i el receptor seria el telescopi. La comunicació pot efectuar-se en ambdós sentits.

¹⁸ Georg Zotti, Alexander Wolf (2019). Stellarium 0.19.0 User Guide (19^a ed.) STELLARIUM.ORG. (pàg.115-119)

¹⁹ Telescope Control plug-in - Stellarium. (s.f.). (Consultat el 15/04/2019), de [http://stellarium.sourceforge.net/wiki/index.php/Telescope_Control_\(client-server\)](http://stellarium.sourceforge.net/wiki/index.php/Telescope_Control_(client-server))

Capítol 3. Disseny del prototip

En aquest capítol s'explica el conjunt del telescopi com un dispositiu mecatrònic, detallant el disseny i càlcul mecànics, els sensors que incorpora, com està estructurada la comunicació i el disseny electrònic.

A la figura 13 es mostra el disseny realitzat amb els software paramètric PTC Creo 5 i les tres principals parts que el formen:

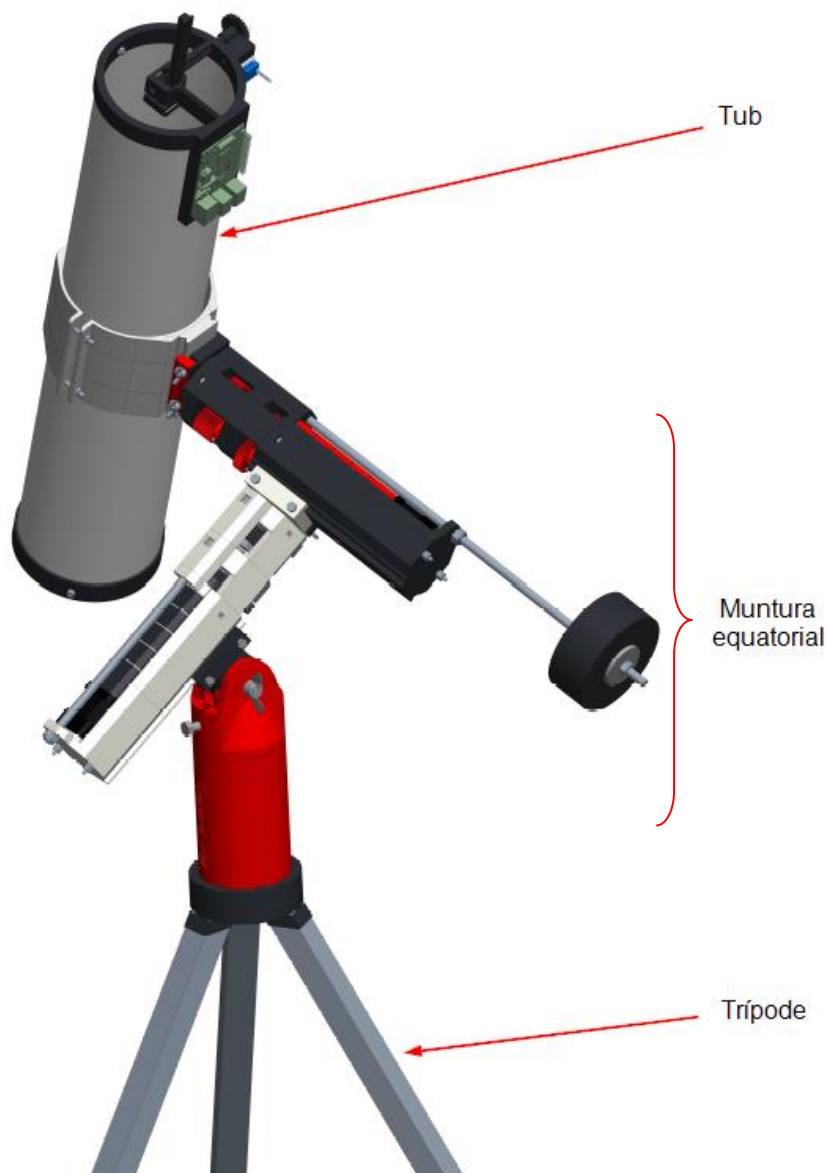


Figura 13. Disseny propi del telescopi realitzat amb PTC Creo 5

Disseny i càlculs mecànics

Tub

El tub està format principalment per un sol mirall principal convex de 114 mm de diàmetre, una Raspberry Pi càmera de 8 megapíxels que rep la llum provinent d'aquest mirall i un mecanisme de pinyó-cremallera que permet moure la càmera linealment mitjançant un servomotor. El servomotor està comandat a través de la Raspberry Pi, fixada també al tub del telescopi.

La tècnica d'utilitzar un sol mirall i una càmera situada a la distància focal s'anomena mètode del focus primari. És requisit indispensable utilitzar una càmera del tipus SLR (*single-lens reflex càmera*), ja que el visor de la càmera ha de mirar directament a través de la lent i aquesta permet veure exactament el que es captura. *Pikon Telescope* és un projecte dissenyat pel *Festival of the Mind* de la Universitat de *Sheffield* (*Yorkshire*, Anglaterra) que utilitza en comptes d'una càmera SLR una càmera de Raspberry Pi retirant les lents frontals. D'aquesta manera permet tenir els mateixos resultats i a un preu molt més econòmic. En aquest projecte ens hem basat en la mateixa teoria i s'ha dissenyat un tub del telescopi personalitzat. (Figura 14).

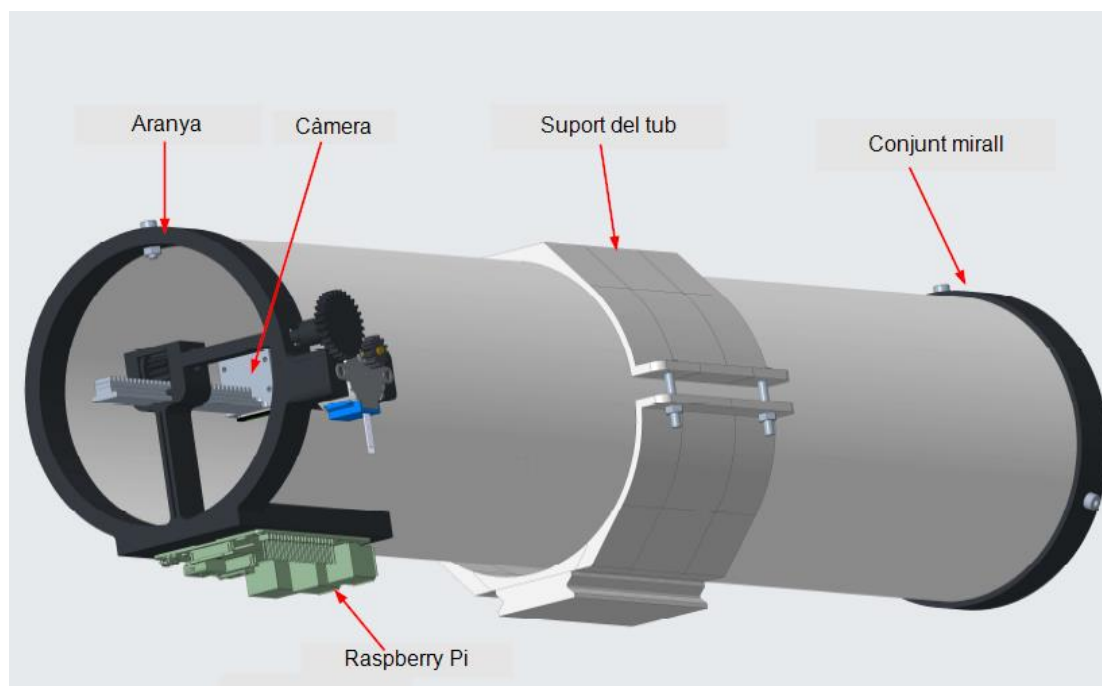


Figura 14. Tub del telescopi

Conjunt mirall

El conjunt mirall s'ha dissenyat amb un mecanisme format per ressorts que permeten ajustar el mirall roscant els cargols que els comprimeixen. Aquest ajustament només cal realitzar-lo la primera vegada, a no ser que el mirall es mogués degut a un cop. S'utilitza un tipus de mirall convex de 113mm de diàmetre especial per ser utilitzat en telescopis. Les característiques d'aquest mirall ens especifica que la distància focal és de 600mm, aquesta dada ens donarà la distància aproximada on s'ha situat la càmera. No és una distància exacta, perquè el telescopi apunta a l'infinit i depenent d'on estigui l'objectiu a visualitzar implica apropar o allunyar la càmera. (Figura 15).

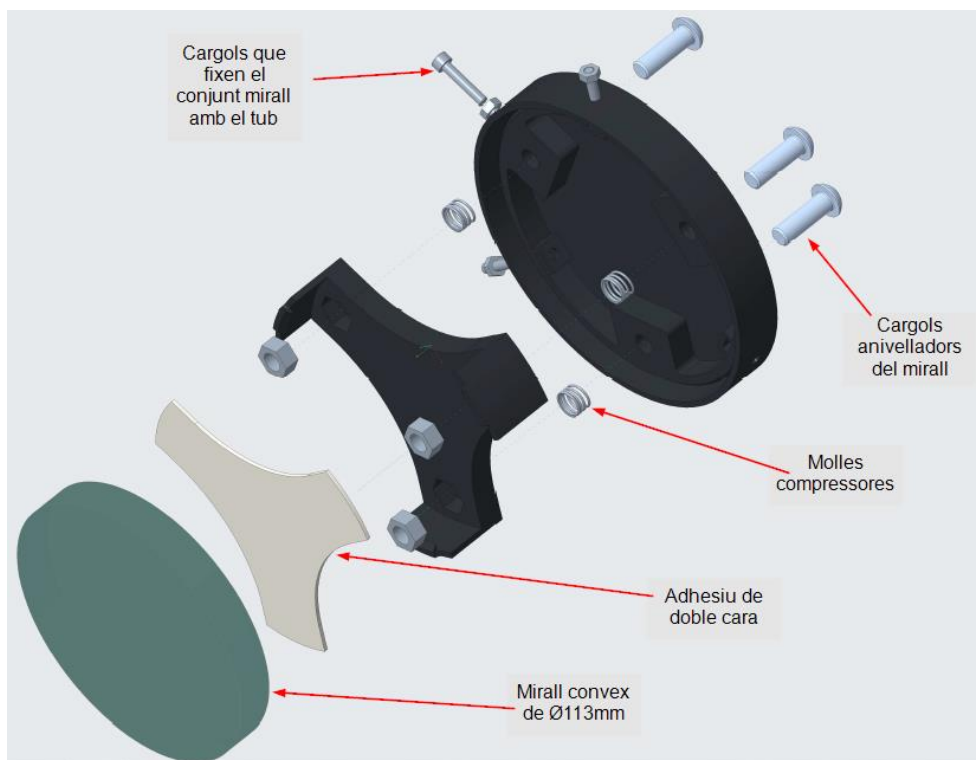


Figura 153. Conjunt mirall

Amb les característiques del mirall podem calcular la raó focal, que ens indicarà quant de lluminós és el telescopi:

$$\text{Raó focal} = \frac{\text{Distància focal}}{\text{Diàmetre del mirall}} = \frac{600 \text{ mm}}{113 \text{ mm}} = 5,31$$

Equació 1. Raó focal.

Es considera una distància focal curta menor de 6, com al nostre cas, i llarga major de 8. Com més curta sigui la distància focal i major el mirall, més lluminós serà el telescopi i més adequat per visualitzar objectes dèbils, com poden ser nebuloses o galàxies, en canvi, si és poc lluminós proporcionarà un bon contrast per observar la Lluna i planetes. Els fabricants de telescopis recomanen una relació focal entre 5 i 10 per visualitzar una mica de tot, per tant, estem dins del rang recomanat, tot i que més adequat per llums dèbils que no pas molt brillants.

Aranya

L'aranya és el conjunt que normalment subjecta el mirall secundari als telescopis reflectors. En aquest projecte es substitueix aquest mirall secundari per la càmera. La càmera es pot moure gràcies al moviment lineal del mecanisme pinyó-cremallera accionat per un motor pas a pas, moviment que permet enfocar la imatge obtinguda. (Figura 16).

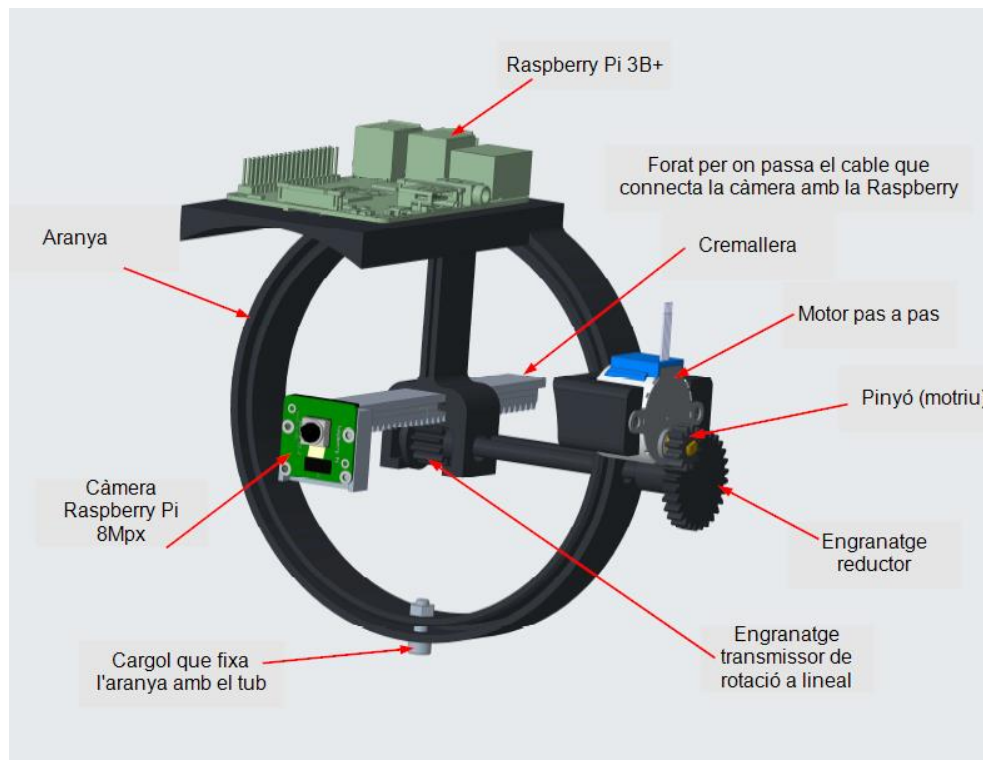


Figura 16. Aranya

La càmera proporciona un camp de visió d'uns $\frac{1}{4}$ de grau, per fer-nos una idea de la magnitud, la Lluna té $\frac{1}{2}$ grau aproximadament. Per tant, no podríem veure la Lluna sencera ja que no disposem d'oculars, veuríem mitja Lluna.

Per enfocar la imatge convé poder moure la càmera poc a poc perquè si la cremallera avancés molt de cop seguiríem sense obtenir una captura nítida. Per això s'ha programat el motor de tal manera que al accionar-lo només recorri un pas de motor. (Figura 174).

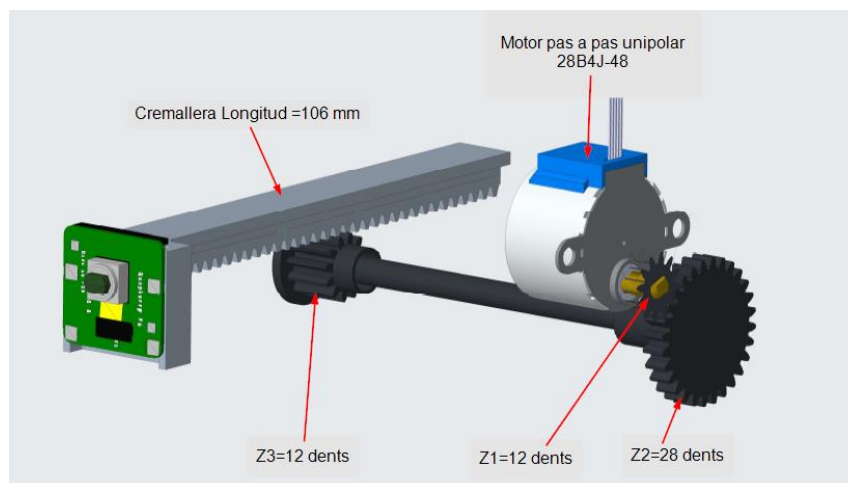


Figura 17. Relació de transmissió mecanisme pinyó-cremallera de la càmera

Per dissenyar aquest mecanisme s'ha tingut en compte els següents requisits:

1. El motor s'ha de col·locar el més a prop possible de l'aranya per tal que el suport del motor i l'aranya siguin una única peça impresa en 3D.
2. Utilitzar un sistema reductor que permeti suavitzar el moviment del motor, per tal que la càmera oscil·li el mínim possible.
3. La càmera s'ha de moure linealment de 2mm en 2mm endavant o enrere per tenir un enfocament acceptable.

Requisit 1:

Per dimensionar els engranatges Z1 i Z2 tenim la limitació de disseny de separació entre elles. Ens basem amb la distància entre centres per dissenyar els engranatges amb una reducció màxima:

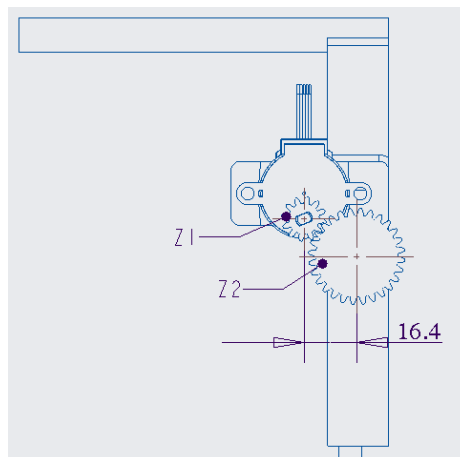


Figura 18. Distància entre centres dels engranatges de l'aranya

Amb aquest límit de 16,4 mm d'entre centres, el mínim diàmetre de pas per Z1 ens queda de 12 mm (més petit se'ns podria deformar al ser imprès en plàstic) i el màxim diàmetre de pas per Z2 de 28 mm. Amb mòdul igual a 1 i un angle de pressió estàndard de 20° obtenim el número de dents:

$$\text{Número de dents} = \frac{\text{diàmetre de pas}}{\text{mòdul}} \rightarrow Z = \frac{d_{pas}}{m}$$

Equació 2. Càlcul del número de dents d'un engranatge

$$Z1 = \frac{12}{1} = 12 \text{ dents}$$

$$Z2 = \frac{28}{1} = 28 \text{ dents}$$

Per dissenyar Z3 tenim la mateixa limitació de disseny entre l'engranatge i la cremallera, recordem que la cremallera ha d'estar col·locada al centre del tub:

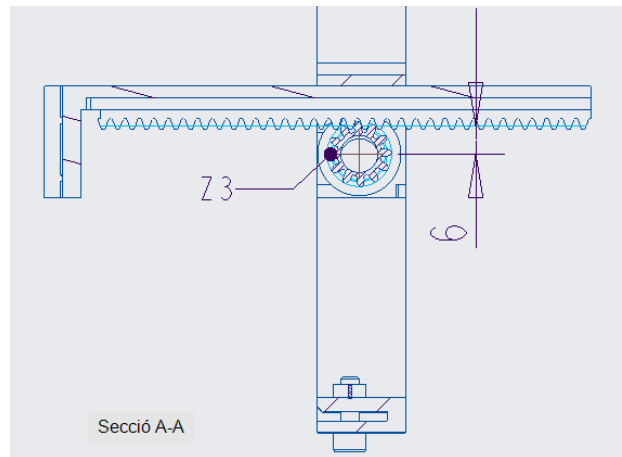


Figura 195. Secció de l'Aranya. Distància entre centres Z3 i cremallera

La distància entre el centre on ha d'anar instal·lat l'engranatge Z3 i la línia de pas de la cremallera és de 6mm, per tant, el diàmetre de pas de l'engranatge ha de ser de $6 \cdot 2 = 12\text{mm}$. Igual que en engranatges anteriors, obtenim el número de dents:

$$Z3 = \frac{12}{1} = 12 \text{ dents}$$

Requisit 2:

Per tal de reduir i suavitzar el moviment, utilitzem un reductor a de Z1 a Z2 amb reducció:

$$i = \frac{Z2}{Z1} = \frac{28}{12} = 2.33$$

S'ha escollit el motor pas a pas 28B4J-48 perquè permet programar-lo a mitjos passos, això ens permetrà aconseguir un moviment lent i suau, amb un parell i consum equilibrat. El parell motor no és gaire important, perquè la massa a moure és mínima. Aquest motor disposa d'una reductora interna de 1/64 i és de 4 bobines, al programar-lo a mitjos passos podem calcular el total d'impulsos necessaris a aplicar per tal que Z1 doni una volta sencera:

$$8 \text{ mitjos passos} \cdot 64 = 512 \frac{\text{passos}}{\text{volta}}$$

Per tant, amb 512 impulsos el motor donarà una volta sencera a Z1. A termes generals, 500 passos ens permet obtenir un moviment suau del motor que compleix amb el mínim d'oscil·lacions a la càmera.

Requisit 3:

El nostre objectiu és moure la càmera linealment de 2 en 2mm. Calculem el número d'impulsos que s'haurà de programar el motor per tal d'aconseguir-ho. Per tal que tots els elements dentats engranin han de tenir el mateix mòdul, o el que és el mateix, igual pas. S'ha dissenyat amb un mòdul de 1, així per cada moviment d'una dent del pinyó Z3 arrastrarà una dent de la cremallera, amb això es desplaçarà una longitud equivalent al seu pas:

$$p_{\text{cremallera}} = \text{pas de Z3} = m \cdot \pi = 1 \cdot \pi = \pi$$

Obtenim quant recorregut es desplaça la cremallera amb una volta de Z3:

$$\frac{\text{Núm dents Z3}}{1 \text{ volta de Z3}} * \frac{1 \text{ dent cremallera}}{1 \text{ dent Z3}} * \frac{\text{pas de la cremallera}}{1 \text{ dent de la cremallera}} =$$

$$= \frac{12 \text{ dents}}{1 \text{ volta Z3}} * \frac{1 \text{ dent cremallera}}{1 \text{ dent Z3}} * \frac{\pi}{1 \text{ dent cremallera}} = 37,70 \text{ mm}$$

Amb 2mm de recorregut de la cremallera Z3 ha d'avançar:

$$2\text{mm} * \frac{2\pi \text{ rad}}{37,70} = 0,3333 \text{ rad}$$

Com que Z3 i Z2 estan units per un eix, giren solidàriament, per tant, el Z2 també ha d'avançar 0.3333 rad. Ara calculem la relació de transmissió entre Z1 i Z2:

$$i = \frac{Z2}{Z1} = \frac{28}{12} = 2,33 \text{ de reducció}$$

Per tan, Z1 ha de girar:

$$0.3333 \text{ rad de z2} * \frac{2.33}{1 \text{ volta de Z2}} = 0,7777 \text{ rad}$$

Ara ja podem calcular quants passos haurem de programar que realitzi el motor per tal que la cremallera recorri 2mm:

$$0.7777 \text{ rad de Z1} * \frac{512 \text{ impulsos}}{2\pi \text{ rad}} = \mathbf{57 \text{ impulsos motor}}$$

Equació 3. Càlcul dels passos a programar el motor perquè la cremallera recorri 2mm de forma suau

Suport del tub

El suport del tub permet que la muntura el pugui subjectar de forma segura. És per això que s'ha dissenyat un sistema que permeti muntar i desmuntar el telescopi de forma fàcil i robust tot i ser imprès en PLA²⁰.

²⁰ Poliàcid làctic, és un polímer amb propietats semblants al PET i molt utilitzat en impressió 3D.

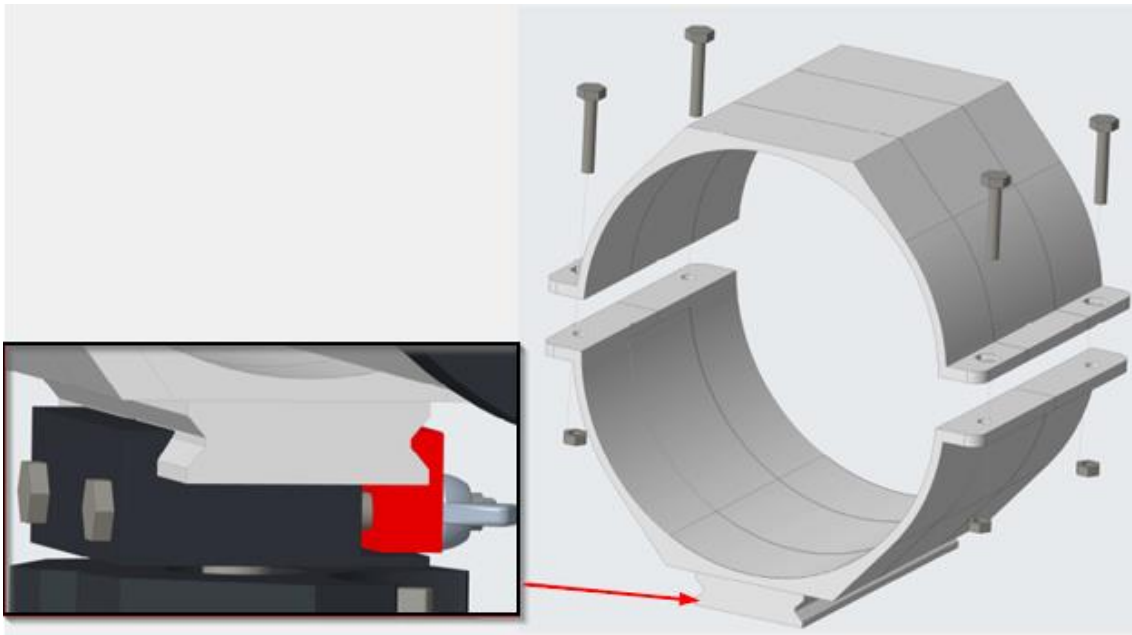


Figura 20. Suport del tub del telescopi

L'eix de declinació DEC subjecta el tub i amb el seu moviment de rotació permet que giri. És molt important que el tub estigui en equilibri respecte l'eix DEC, per tal que no hagi de fer esforços innecessaris. Per saber en quin punt del tub hem de col·locar el suport cal conèixer com estan repartides les càrregues al tub. S'ha tractat el model com una biga recolzada en un sol punt i tres càrregues: la càrrega del mirall, del conjunt de la Raspberry Pi i de l'aranya:

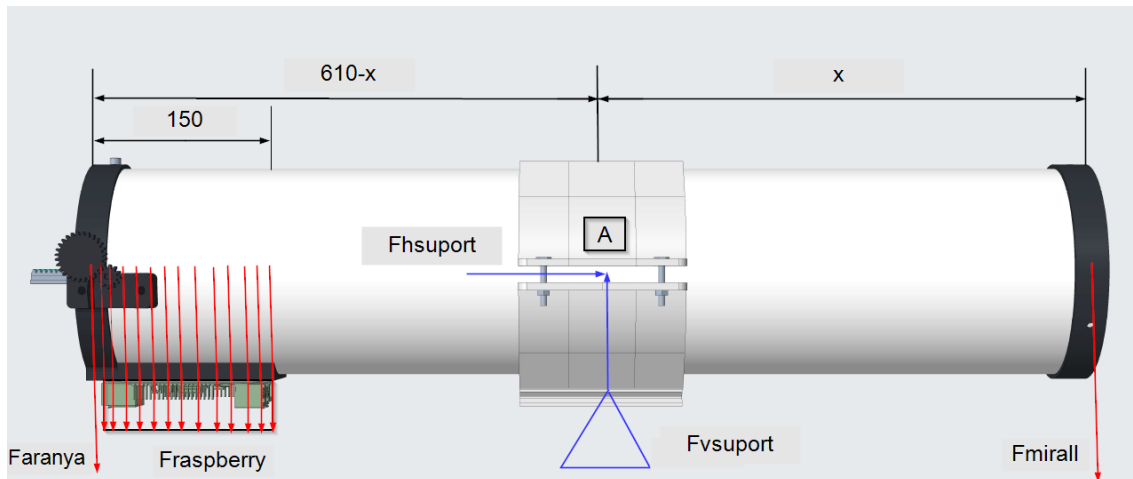


Figura21. Diagrama del sòlid lliure amb les càrregues del conjunt tub

Es coneix:

$$P_{\text{mirall}} = 0.8\text{Kg} \quad \rightarrow \quad F_{\text{mirall}} = P_{\text{mirall}} * g = 0.8 * 9.82 = \mathbf{7,86 \text{ N}}$$

$$P_{\text{RaspberryPi}} = 0.2\text{Kg} \quad \rightarrow \quad F_{\text{RaspberryPi}} = P_{\text{RaspberryPi}} * g = 0.2 * 9.82 = \mathbf{1,96 \text{ N}}$$

$$P_{\text{aranya}} = 0.4\text{Kg} \quad \rightarrow \quad F_{\text{aranya}} = P_{\text{aranya}} * g = 0.4 * 9.82 = \mathbf{3,93 \text{ N}}$$

Es resol el problema estàtic plantejant l'equilibri de moments:

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{\text{aranya}} (0,610 - x) + F_{\text{RaspberryPi}} \left(0,610 - \frac{0,150}{2} - x\right) - F_{\text{mirall}} * x = 0$$

$$3,93 * (0,610 - x) + 1,96 * \left(0,610 - \frac{0,150}{2} - x\right) - 7,84x = 0$$

$$x = 0,251\text{m} = \mathbf{251 \text{ mm}}$$

Equació 4. Càlcul de la posició del suport del conjunt tub

Per tant, el suport del tub s'haurà de col·locar a una distància de 251 mm respecte el mirall.

Muntura

Justificació dels motors dels eixos

La muntura equatorial que es dissenya està formada per dos eixos que poden rotar 360° de forma independent. Cada eix haurà de suportar unes càrregues i un parell diferent en moviment, però es dissenyaran igual tenint en compte el més desfavorable. Primer es calcularà el parell necessari per moure el conjunt de l'eix DEC i després l'eix AR.

Eix DEC:

De l'apartat anterior, suport del tub, coneixem les masses d'aquest conjunt, amb la distància respecte el centre de masses podem calcular el moment d'inèrcia total:

$$I_{\text{tub}} = \frac{M_{\text{tub}}}{4} * (R_{\text{ext}}^2 + R_{\text{int}}^2) + \frac{(M_{\text{tub}} * L)^2}{12} = \frac{0,4}{4} * \left(\left(\frac{0,128\text{mm}}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,125}{2} \right)^2 \right) + \frac{0,4 + 0,610^2}{12} = 0,065142 \text{ kgm}^2$$

$$I_{\text{mirall}} = M_{\text{mirall}} * d^2 = 0,8 * 0,251^2 = 0,050401 \text{ kgm}^2$$

$$I_{\text{aranya}} = M_{\text{aranya}} * d^2 = 0,4 * 0,359^2 = 0,051552 \text{ kgm}^2$$

$$I_{\text{raspberry}} = M_{\text{raspberry}} * d^2 = 0,2 * 0,284^2 = 0,016131 \text{ kgm}^2$$

$$I_{\text{conjunt tub}} = I_{\text{tub}} + I_{\text{mirall}} + I_{\text{aranya}} + I_{\text{raspberry}} = 0.18323\text{Kgm}^2$$

Per calcular l'acceleració angular es té en compte que el telescopi ha de girar a una velocitat força lenta i controlada. Tenim en compte una velocitat angular de màxim 1rpm:

$$\Omega = 1 \text{ rpm} = \frac{1 \text{ rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} = \frac{\pi}{30} \text{ rad/s}$$

$$w = w_0 + at; \quad \alpha = \frac{\pi}{30} \text{ rad/s}^2$$

Ja podem calcular el parell necessari perquè l'eix DEC mogui el conjunt tub:

$$\tau_{conjunt \text{ tub}} = I_{conjunt \text{ tub}} * \alpha = 0.18323 \text{ kgm}^2 * \frac{\pi \text{ rad}}{30 \text{ s}^2} = 0.019188 \text{ Nm} = \mathbf{1.9188 \text{ Ncm}}$$

Equació 5. Càlcul del parell necessari per moure l'eix DEC

És important remarcar que el parell calculat és relativament baix gràcies a limitar la velocitat angular a 1rpm, si per exemple volguéssim girar el tub a 60rpm el parell necessari augmentaria fins a 1.15Nm (60 vegades superior).

Eix AR:

Recordem que l'eix AR és el que més càrrega haurà de suportar, calculem primer la posició on haurém de col·locar el contrapès:

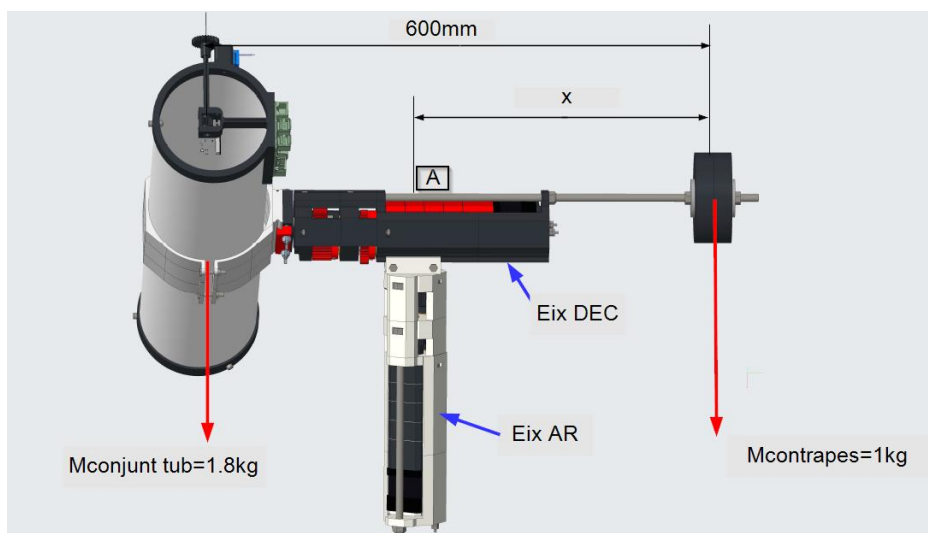


Figura 22. Càlcul de la posició d'equilibri del contrapès

$$\sum M_A = 0 \rightarrow F_{conjunt \text{ tub}}(0.6 - x) - F_{contrapes} * x = 0$$

$$(1.8 * 9.82)(0.6 - x) - (1 * 9.82)x = 0$$

$$x = 0.386 \text{ m}$$

De la mateixa forma que s'ha calculat el parell necessari per poder girar el conjunt en l'eix DEC, es realitza per aquest eix també:

$$I_{conj.tub}^{21} = I_{tub} + I_{mirall} + I_{aranya} + I_{raspberry} = 0,18323 \text{ kgm}^2$$

$$I_{contrapes} = M_{contrapes} * d^2 = 1 \text{ kg} * 0,386^2 = 0,386 \text{ kgm}^2$$

²¹ Calculat anteriorment amb l'eix DEC

$$I_{total\ AR} = I_{conj.tub} + I_{contrapes} = 0,56923\ kgm^2$$

Limitem la velocitat angular també a 1rpm:

$$w = w_0 + \alpha t; \quad \alpha = \frac{\pi}{30}\ rad/s^2$$

Obtenim el parell necessari per fer girar l'eix AR:

$$\tau_{AR} = I_{total\ AR} * \alpha = 0,56923\ kgm^2 * \frac{\pi\ rad}{30\ s^2} = 0,059610\ Nm = \mathbf{5,9610\ Ncm}$$

Com era d'esperar, el parell necessari per moure l'eix AR és superior al de moure l'eix DEC.

Per poder girar a una velocitat màxima de 1rpm estem obligats a utilitzar un reductor a cada motor dels eixos, ja que la majoria de motors ofereixen un parell màxim amb una velocitat major. No només per això, també perquè durant el seguiment d'un astre la velocitat angular encara serà menor, ja que el temps que tarda la Terra en donar una volta sencera sobre sí mateixa és el temps que ha de tardar l'eix AR en girar 360° en mode seguiment:

$$23h * 3600 \frac{segons}{hora} + 56\ min * \frac{60s}{1min} + 4s = \\ = \mathbf{86164\ segons\ que\ tarda\ la\ Terra\ a\ donar\ una\ volta\ sobre\ sí\ mateixa}$$

Una volta mesurada en arcsegons:

$$360\ graus * 60 \frac{arcminuts}{graus} * 60 \frac{arsegons}{arcminuts} = 1296000\ arcsegons$$

La velocitat de rotació de la Terra en arcsegons per segon:

$$\frac{1296000\ arcsegons}{86164\ segons} = \mathbf{15,04108\ \frac{arcsegons}{segons}}$$

Equació 6. Càlcul de la velocitat de rotació de la Terra

El motor de l'eix AR en mode de seguiment d'un astre haurà de girar a una velocitat de:

$$\left(\frac{1rev}{86164s} \right) * \frac{60s}{1rev} = \mathbf{6,96 \cdot 10^{-4}\ rpm}$$

Per tant, necessitem un reductor que ens permeti mantenir aquesta velocitat angular tant reduïda i capaç d'oferir un parell motor segons els càlculs obtinguts anteriorment.

Els càlculs del parell necessari per girar els eixos ens indiquen que l'òptim és utilitzar dos motors diferents per a cada eix. No obstant, es vol simplificar el model utilitzant dos eixos amb un sistema reductor idèntics, per tant, s'utilitzaran dos motors iguals tenint en compte el parell calculat major (de l'eix AR).

El motor escollit és un motor pas a pas bipolar de 30 Ncm de parell nominal, amb un angle de pas de 1.8° i 200 passos/revolució, 1.7 A per fase alimentat a 12 V. Les seves dimensions i pes també s'ha tingut en compte, ja que es necessita un motor de dimensions reduïdes i poc pes. En aquest cas és un NEMA 17 de 380 g. (Figura 6).

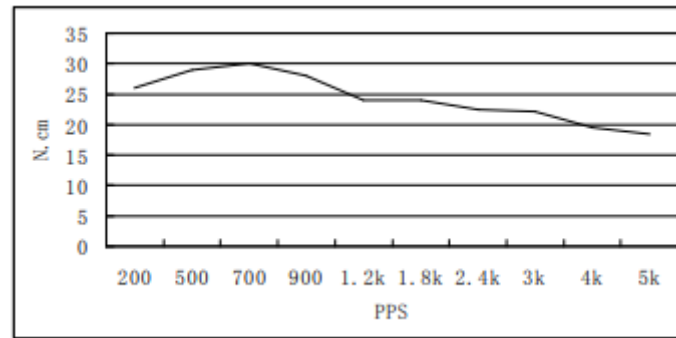


Figura 23. Gràfica del parell del motor segons velocitat mesurada en polsos per segon i a mitjos passos

Tal i com es pot observar a la figura 23, no podem fer girar el motor a menys de 1rpm, per tant, s'haurà d'utilitzar un reductor.

Reductor epicicloidal

Per tal de dissenyar el reductor s'ha de conèixer la reducció que s'ha d'obtenir, però primer necessitem definir la velocitat d'entrada i de sortida. Segons la figura 23 el motor escollit assoleix un parell màxim de 30 N*cm a 700 polsos per segon, per tant:

$$\frac{700 \text{ pps}}{\left(\frac{200 \text{ pas}}{\text{rev}}\right)} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 210 \text{ rpm}$$

La velocitat d'entrada al reductor serà de 105 rpm, així garantim un parell màxim. La velocitat de sortida ha de ser a que ens permeti fer girar el telescopi i també ens permeti realitzar un seguiment dels astres. S'ha d'escollir una velocitat de sortida tenint en compte que es faran anar els motors tant per seguiment d'astres com per un control més manual. Per tant, no poden funcionar sempre a una velocitat tant lenta com la de la rotació de la Terra calculada anteriorment ($6.96 \cdot 10^{-4} \text{rpm}$) perquè sinó sempre tardaria quasi 24h en donar una revolució, és per això que es considera una velocitat suficientment reduïda inicial de 0.2 rpm. La relació de transmissió és:

$$i = \frac{w_{\text{sortida}}}{w_{\text{entrada}}} = \frac{0.2 \text{ rpm}}{210 \text{ rpm}} = 9,5238 \cdot 10^{-3}$$

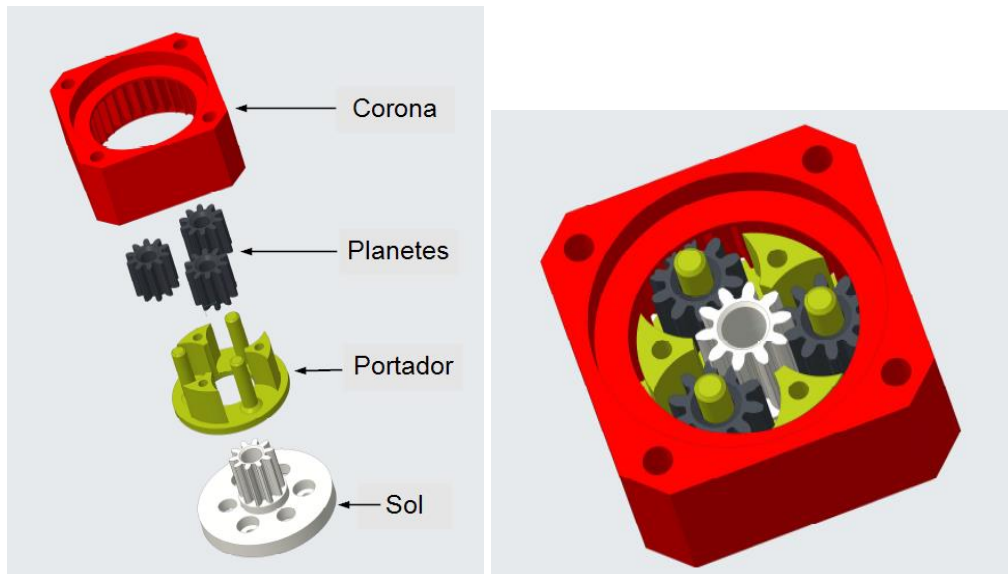
La reducció que necessitem realitzar és la inversa de la relació de transmissió:

$$\text{Reducció} = \frac{1}{i} = \frac{1}{9,5238 \cdot 10^{-3}} = 1050$$

Equació 7. Càlcul de la reducció a partir de la relació de transmissió

D'inici hauríem de dissenyar un reductor pel motor que sigui capaç d'aconseguir **com a mínim una reducció de 1050:1**.

El motor ha d'anar instal·lat a l'eix, això ens limita les dimensions del reductor i ens obliga a dissenyar-ne un el més compacte possible i eficient. Finalment s'opta per un reductor epicicloidal o també conegut com de tipus planetari. (Figura 24).



*Figura 24. Un dels mòduls del reductor planetari dissenyat per moure els eixos
imatge de l'esquerra vista explosionada, a la dreta amb els components muntats.*

Els components d'aquest reductor representats a la figura 24 són:

- Sol: és l'engranatge central i el que transmet el moviment als planetes.
- Portador: subjecta els 3 planetes i permet que rotin sobre els seus eixos.
- Planetes: quan el sol els hi transmet el moviment giren els 3 a la vegada sobre la corona, això permet que el portador també roti i transmeti aquesta rotació al següent mòdul reductor.
- Corona: permet compactar tot el conjunt.

Els motius pels que s'ha dissenyat aquest tipus de reductor són pels avantatges següents:

- Major repetibilitat: ofereix una transmissió uniforme i de baixes vibracions a diferents càrregues, proporcionant una repetibilitat perfecta.
- Precisió: disposa d'una alta estabilitat angular rotativa i això millora la precisió i fiabilitat del moviment.
- Poc sorollós: al disposar de molta superfície de contacte entre els engranatges, la rotació és molt suau i sense salts.
- Alta nivells d'eficiència: és dels reductors que ofereixen més eficiència, gràcies al seu disseny i disposició interna que minimitza les pèrdues durant el funcionament.
- Major transmissió de parell: es deu a que els engranatges tenen la major part de les dents en contacte, això permet que el mecanisme sigui capaç de transmetre i suportar més parell i, a més, d'una forma uniforme.
- De fàcil instal·lació: tot el mecanisme queda compactat a una caixa reductora cilíndrica que permet instal·lar-lo fàcilment.

S'ha dissenyat tot el sistema reductor planetari a partir de les dimensions del motor. (Figura 25).

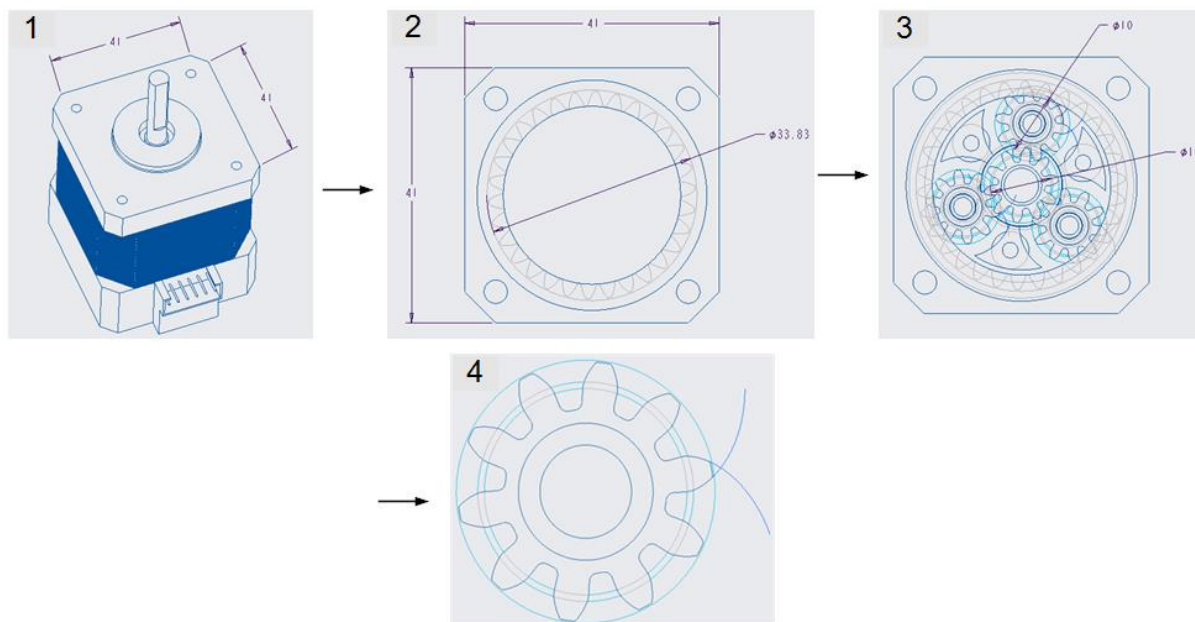


Figura 25. Mètode seguit per dissenyar el reductor epicicloidal

- 1) S'ha partit de la restricció de mida exterior del motor (41 x 41 mm).
- 2) S'ha dissenyat la corona amb les mateixes mides del motor, això ens ha definit el diàmetre de pas de les dents de la corona.
- 3) A partir del diàmetre de pas de la corona s'ha calculat els diàmetres de pas dels engranatges planetaris i del sol per tal d'obtenir una reducció de 4:1.
- 4) Amb l'objectiu de tenir una reducció de 4:1 i havent establert els diàmetres primitius dels tres engranatges, finalment s'ha calculat el número de dents i tot amb un mòdul de 1 i angle de pressió estàndard de 20°.

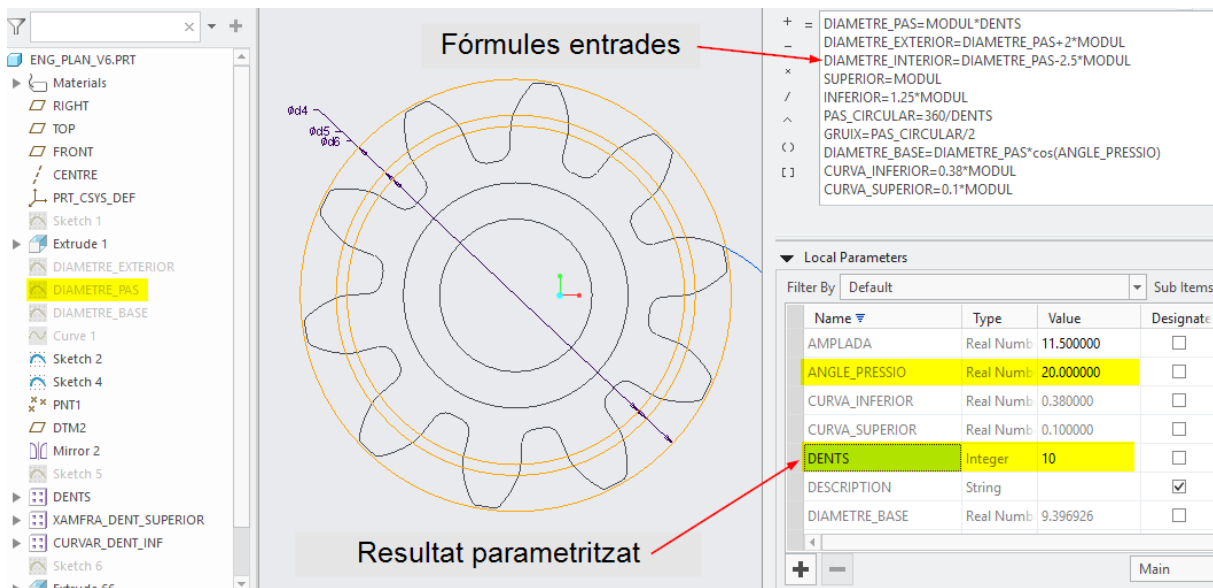


Figura 26. Mètode seguit pel disseny de tots els engranatges del reductor

S'ha dissenyat tots els engranatges entrant totes les fórmules corresponents al disseny dels diàmetres, pas i radis d'acord. El software paramètric de PTC Creo 5 ens ha permès obtenir tots els resultats de les equacions anteriors amb les variables d'amplada, angle de pressió i diàmetre de pas. Això ens ha permès poder experimentar amb diferents mòduls, número de dents a partir d'un diàmetre de pas que recordem que ens ha vingut definit per les dimensions del motor. Una fórmula molt important en el disseny de les dents dels engranatges ha estat la corba involuta, també parametritzada amb el software de dibuix. (Figura 7).

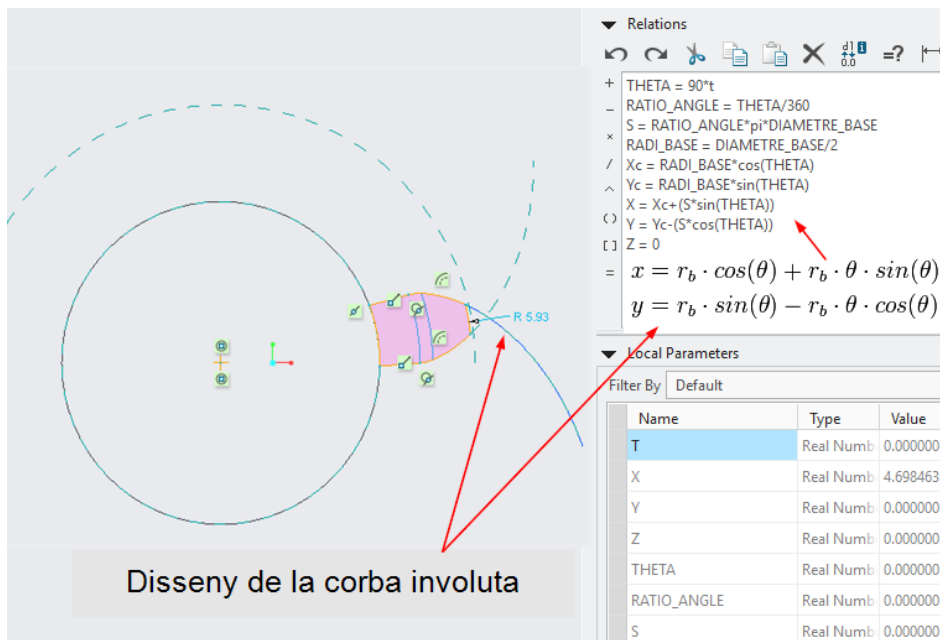


Figura 27. Disseny d'una dent de l'engranatge planeta del reductor epicicloidal

Amb un mòdul de reducció s'ha aconseguit una reducció de 4:1. Muntant un total de 5 mòduls iguals un sobre l'altre obtenim la reducció de 1024:1, gairebé la que necessitem de 1050:1 ²²:

$$i = \frac{ws}{we} = \frac{4}{1} * \frac{4}{1} * \frac{4}{1} * \frac{4}{1} * \frac{4}{1} = \mathbf{1024}$$



Figura 28. Reductor epicycloidal amb una reducció de 1024:1

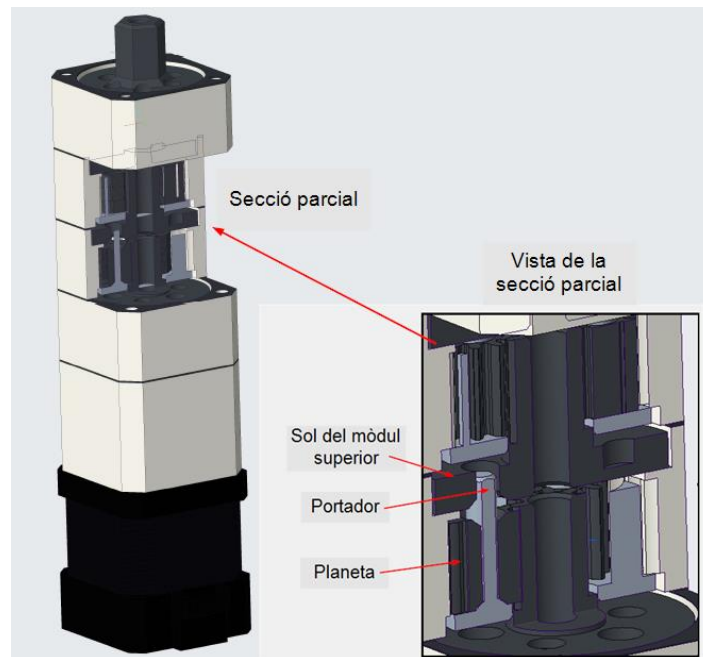


Figura 29. Detall de la unió entre els mòduls reductors epicycloidals.
On el portador gira solidari amb l'engranatge "sol" superior.

²² Veure: Equació 7. Càlcul de la reducció a partir de la relació de transmissió

Es necessita més elements de transmissió reductors per tal d'assolir un mínim de 1050:1. En comptes d'afegir més mòduls epicicloïdals, es dissenya una transmissió amb engranatges rectes que permetin transmetre el moviment a un eix. Aquest eix permet fer girar un altre engranatge recte solidari a la pinça que subjecte el tub del telescopi. D'aquesta forma s'aconsegueix una reducció major, un conjunt molt més sòlid format per elements d'acer, com l'eix inoxidable, rodaments que fan la funció de recolzament i engranatges d'impressió 3D. Sense aquests elements metàl·lics tindriem un reductor que compliria amb la reducció requerida però format per material elastòmer amb un límit elàstic insuficient per suportar tot el conjunt del telescopi²³. (Figura 30).

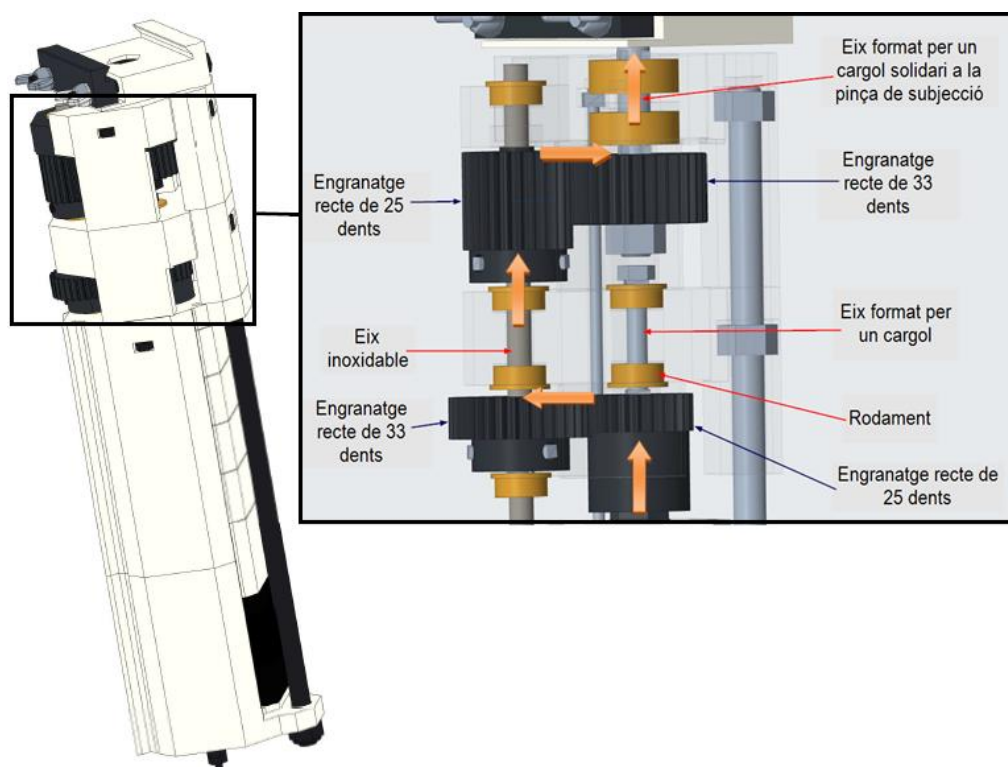


Figura 30. Conjunt eix reductor amb detall de la reducció entre mòduls epicicloïdals i pinça de subjecció

Amb la reducció d'aquests engranatges rectes s'aconsegueix la següent reducció:

$$i = \frac{33 \text{ dents}}{25 \text{ dents}} * \frac{33 \text{ dents}}{25 \text{ dents}} = 1,74$$

Per tant, la reducció total del conjunt d'un eix del telescopi és de:

$$i_{total} = 1024 * 1,74 = \mathbf{1781,76}$$

Equació 8. Càlcul de la reducció total d'un eix del telescopi

S'ha aconseguit una reducció total de 1781,76:1, molt major que la mínima buscada de 1050:1. Si tornem a calcular de forma inversa l'equació 7 amb aquest nou valor de reducció, s'obté una velocitat angular a la sortida de:

²³ S'ha pogut comprovar experimentalment que el reductor format només per engranatges impresos en PLA era insuficient per suportar tot el conjunt del telescopi. D'aquí el re-disseny amb incorporació d'unions metàl·liques.

$$\text{Reducció} = \frac{1}{i} = 1781,76 \rightarrow i = 5,61243 \cdot 10^{-4}$$

$$i = \frac{w_{sortida}}{w_{entrada}} \rightarrow 5,61243 \cdot 10^{-4} = \frac{w_{sortida}}{210rpm} \rightarrow w_{sortida} = 0,11786 rpm = 1,23454 \cdot 10^{-2} \frac{rad}{s}$$

Equació 9. Segona iteració per calcular la velocitat angular de sortida en rpm

A l'equació 7 s'havia considerat de partida un velocitat angular de sortida de 0,2 rpm, amb tota la reducció s'ha aconseguit disminuir quasi a la meitat aquest valor, fet que ens beneficia amb dos aspectes molt importants:

- 1) Una velocitat angular menor que permet ajustar-se millor al seguiment d'astres.
- 2) Un parell torçor major capaç de suportar tot el conjunt amb un factor de seguretat conservador de:

$$P_{motor} = \tau * w_{motor} = 0,3Nm * 22 \frac{rad}{s} = 6,59734W$$

$$\tau_{reductor} = \frac{P_{motor}}{w_{sortida}} = \frac{6,59734W}{0,0123457rad/s} = 534,40Nm \rightarrow \tau_{reductor} = 534.40Nm \gg \tau_{eix AR calculat} = 5.9610 Ncm$$

Equació 10. Comparació del parell torçor necessari del telescopi amb el parell torçor obtingut amb el reductor

Suport de la muntura

És l'encarregada de subjectar tota la muntura i el tub amb dos requeriments de graus de llibertat: un gir de 360° per poder posicionar el telescopi enfocant el Nord i un moviment vertical per poder inclinar la muntura els mateixos graus que la latitud on es troba el telescopi. Per tal d'ajustar gradualment la latitud, s'incorpora una maneta amb un cargol de M8 que permet convertir el moviment lineal de rosca amb un moviment angular.



Figura 31. Suport de la muntura amb 2 graus de llibertat

Disseny de la comunicació

Un dels objectius principals d'aquest projecte és tenir un telescopi IoT²⁴, això ens permetrà controlar-lo remotament i rebre dades dels sensors que hi tenim instal·lats.

Tot sistema de comunicació està regit per normatives, instruccions i regles anomenades **protocols**. Aquests estableixen pautes que permeten que diferents elements que formen part d'un sistema puguin establir comunicacions entre ells. El protocol IoT més estès i també utilitzat en aquest projecte és el **MQTT**²⁵, ja que permet minimitzar l'ample de banda, comunicació bidireccional entre els dispositius, optimitza els consums i garanteix una certa fiabilitat i rapidesa de transmissió de les dades. Utilitza una tipologia en estrella on un dispositiu realitza la funció de *broker*, pel qual passen tots els missatges, i tots els dispositius anomenats *clients* es connecten a través d'ell. (Figura 32).

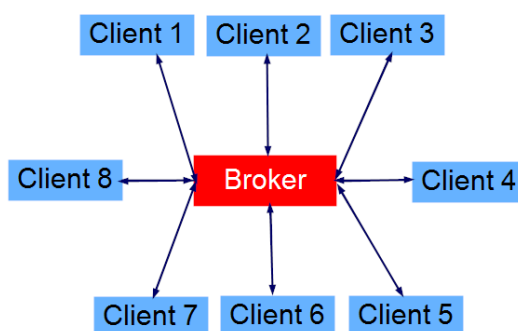


Figura 32. Esquema de la comunicació en estrella del protocol MQTT

En el telescopi s'utilitza com a màster el microprocessador **Raspberry Pi 3B+** on hi ha instal·lat el broker MQTT **Mosquitto** i tots els missatges han de passar a través d'ell. *Mosquitto* és el broker MQTT que s'ha escollit per la seva lleugeresa, per ser de codi obert i gratuït. Es disposa de 3 microcontroladors **ESP32** que són els clients del sistema, són de dimensions reduïdes, incorporen un mòdul wifi i s'ha utilitzat la coneguda plataforma IDE d'Arduino per programar-los.

Els ESP32, que fan la funció de client, publiquen missatges i es subscriuen per rebre'n. El broker Mosquitto de la Raspberry accepta aquests missatges i els difon entre els clients subscriptes. Per tal que el broker difongui el missatge al client corresponent ho fa a partir del **tòpic**, que és el tema del missatge que s'envia. El client que publica un missatge ho fa amb un tòpic concret i quan el rep el broker l'envia només al/-s client/-s que estan subscriptes a aquest mateix tòpic. (Figura 33).

²⁴ *Internet of Things*, Internet de les Coses.

²⁵ *Message Queue Telemetry Transport*

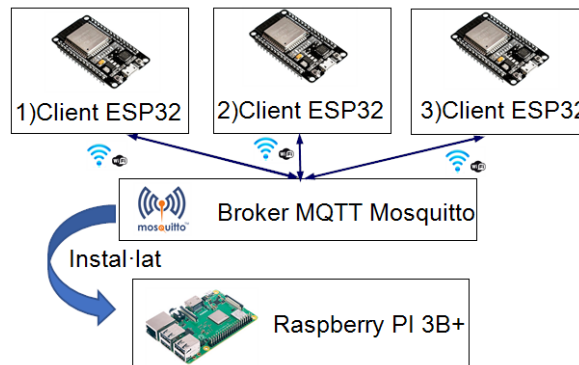


Figura 33. Clients, broker i màster del projecte

Per tal de comunicar via MQTT els clients ESP32 i el broker Mosquitto instal·lat a la Raspberry s'utilitza una eina anomenada **Node-RED**. Aquesta ens permet programar de forma visual i simplificada. Va ser creada per IBM l'any 2013 i s'ha escollit perquè ens permet comunicar el *hardware* i serveis fàcilment, es pot instal·lar a la Raspberry Pi, és de codi obert i gratuïta. Utilitza com a estructura mínima els nodes, que s'arrossegueu mitjançant la interfície gràfica i ens permeten realitzar una tasca concreta, com pot ser rebre un missatge d'un dels microcontroladors ESP32 mitjançant MQTT, visualitzar el missatge per pantalla i enviar-lo a un altre ESP32. (Figura 34).

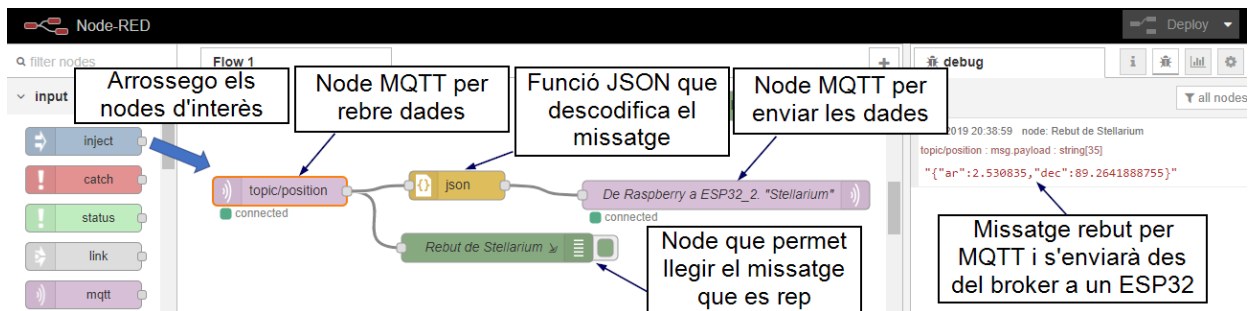


Figura 34. Fragment de la programació amb Node-RED del projecte

Control del telescopi amb interfície d'usuari IoT

La primera forma de comandar el telescopi de forma remota és mitjançant una interfície d'usuari IoT, basada en pulsar botons digitals per moure els motors, visualitzar vídeo en directe de la càmera i rebre les dades dels sensors.

El Node-RED permet configurar una plataforma anomenada *dashboard* que a partir de la programació dels nodes, un o més usuaris connectats puguin interactuar amb el model. S'ha configurat un total de 10 botons i un visualitzador del vídeo provinent de la càmera. (Figura 35).

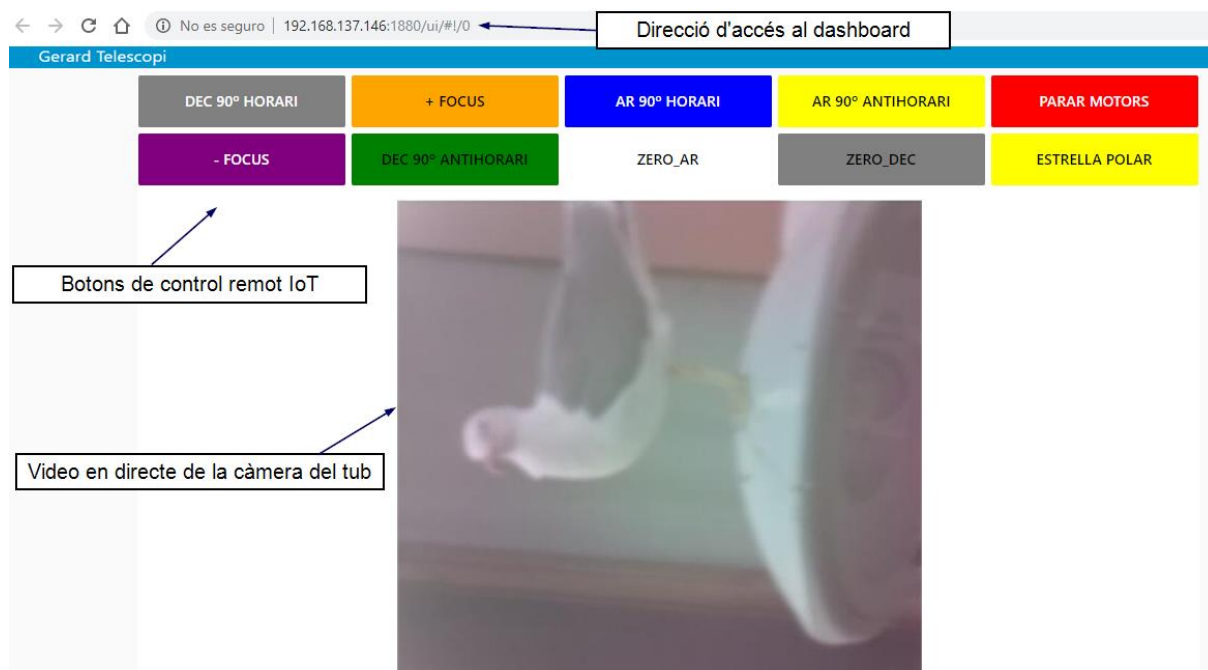
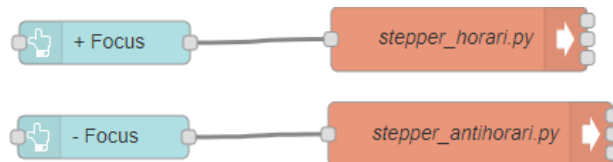


Figura 35. Interfície d'usuari amb plataforma IoT del Node-RED dashboard

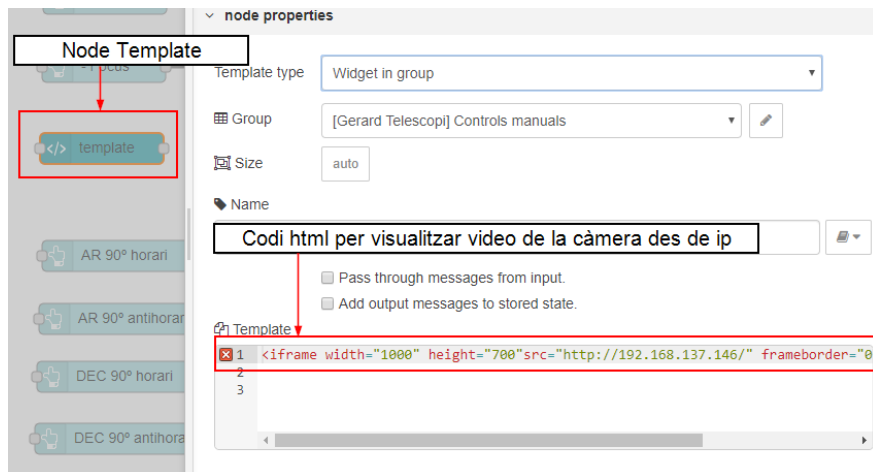
- 2 botons de “+ Focus” i “– Focus” per moure en sentit horari i antihorari el motor del tub encarregat de moure el mecanisme pinyó-cremallera i enfocar la càmera. Cada botó executa un codi python guardat dins la Raspberry encarregat de fer moure el motor pas a pas i desplaçar la cremallera 2mm²⁶:



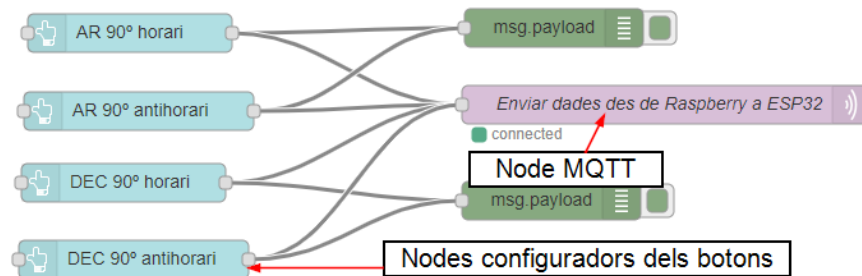
- L'usuari visualitza en directe el vídeo enregistrat per la càmera del tub. S'ha programat la càmera amb un senzill codi amb llenguatge *html* que des d'Internet local²⁷ s'hi pot accedir escrivint la ip de la Raspberry. S'ha utilitzat un node *Template* que permet executar el codi html creat i així transmetre-ho al dashboard:

²⁶ Veure Equació 3. Càlcul dels passos a programar el motor perquè la cremallera recorri 2mm de forma suau

²⁷ Tots els usuaris connectats al mateix wifi que la Raspberry poden accedir a la interfície d'usuari creada.



- Dos botons per controlar el motor de l'eix AR i dos més per l'eix DEC. Cada un controla un sentit, s'ha limitat el recorregut a realitzar exactament 90° ($\pi/2$ rad) si no s'interromp la seqüència. Darrera d'aquests botons hi ha configurat un node MQTT que envia les dades al ESP32 número 1, encarregat de moure els motors. Aquest ESP32 s'ha programat tenint en compte la transmissió de reducció i aconseguir aquest quart de volta exacte:



- És obligat configurar un botó que aturi tots els moviments que estiguin executant els 3 motors del Telescopi. Es tracta d'un botó que predomina sobre tots els altres, actua com una interrupció del codi, però de forma més rudimentària. És a dir, primer es va intentar programar una interrupció causada per aquest botó d'aturament, el problema és que la interrupció s'ha d'enviar per MQTT i el programa executat al ESP32 ha de ser capaç de sortir de la seqüència que compta els passos del motor i activa els pins de sortida per moure els motors. Davant la no resolució del problema d'executar el *callback* quan el programa està dins d'un *loop*, s'ha procedit a utilitzar l'ESP32 número 2. Quan es polsa el botó de *Parar motors* s'envia un missatge per MQTT a l'ESP32 número 2 que activa un pin digital de sortida que activa una entrada de l'ESP32 número 1. La condició d'activar el pin digital de l'ESP32 número 1 condiona a sortir del *loop* que compta els passos del motor i conseqüentment aturar-lo. La seqüència gràfica seria la de la figura 36:

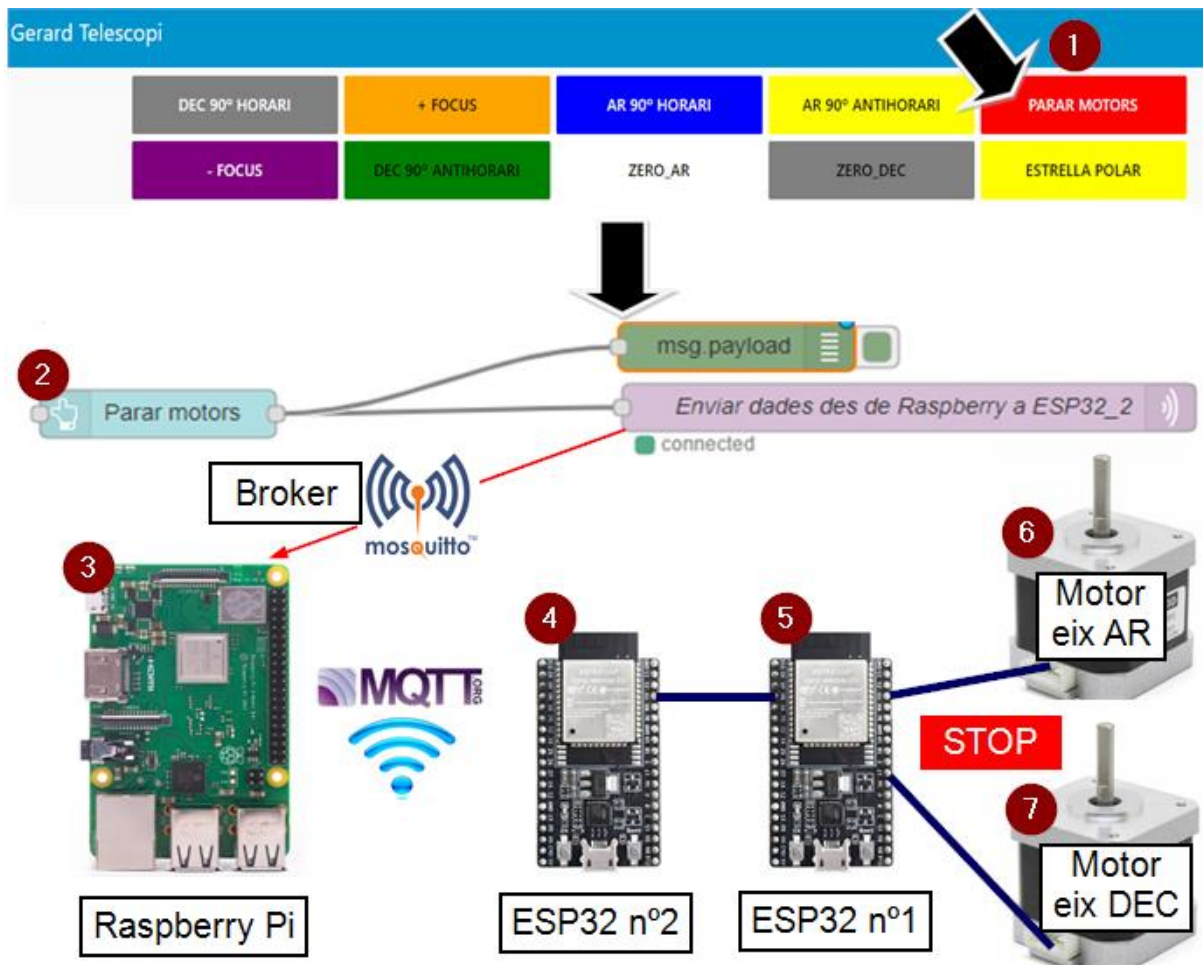


Figura 36. Esquema de comunicació quan l'usuari prem el botó d'aturada d'un motor

- Finalment, 2 botons per estacionar el telescopi a la posició de *Zero AR* i *Zero DEC*. Permeten que els dos eixos es quedin en una posició de "zero". Al utilitzar motors de tipus pas a pas en comptes de servomotors, el primers no tenen memòria de posició un cop apagats. A l'enegar-los no es pot reconèixer una posició concreta a no ser que hi col·loquem un sensor. S'ha escollit un sensor del tipus *hall* instal·lat a cada eix de la muntura i a la pinça de subjecció s'ha col·locat un imant de neodimi en una posició determinada. Un cop polsat el botó de *Zero*, l'eix corresponent gira en sentit horari fins que el sensor hall detecta el camp magnètic provocat per l'imant i atura el motor. S'ha escollit aquest tipus de sensor perquè no hi ha fregament entre les dues parts, si per exemple s'hagués optat per un polsador, necessitaria de contacte i la pinça no podria girar lliurement 360°. En aquest cas l'esquema de comunicació seria semblant al de la [Figura](#), però connectant també el sensor hall a l'ESP32 n°1 i programant un *while* que faci girar el motor de l'eix fins que el sensor detecti l'imant o es premi el botó d'aturada. (Figura 37 i 38).

```
void hall_AR_horari ()  
{  
  while (digitalRead(hallAR) == HIGH & digitalRead(stopPin) == LOW)  
  {  
    Serial.println("sentit horari");  
    digitalWrite(dirPinAR, HIGH);  
    digitalWrite(stepPinAR, HIGH);  
    delayMicroseconds(stepDelay);  
    digitalWrite(stepPinAR, LOW);  
    delayMicroseconds(stepDelay);  
  }  
  Serial.println("Hall AR detectat");  
}
```

Girar el motor mentre no es detecti el motor i el botó d'aturada no es premi

Figura 37. Fragment de la funció programada a l'ESP32 n°1 per posicionar el "Zero"

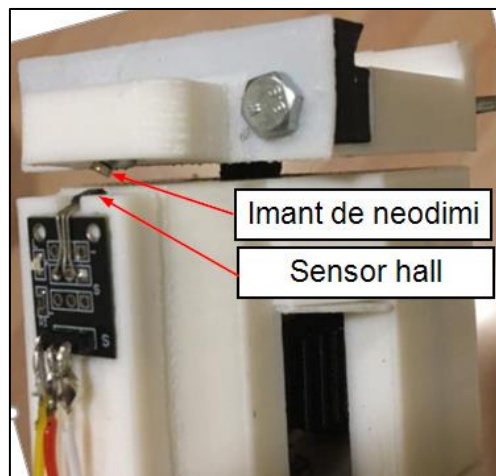


Figura 38. Sensor hall i imant de neodimi que permeten posicionar el "Zero" dels eixos

Per tal que la Raspberry i els ESP32 puguin comunicar-se per MQTT han d'estar connectats a la mateixa xarxa. S'utilitza l'ordinador portàtil per connectar-se a qualsevol xarxa, tant sigui wifi com *ethernet* i amb l'opció de compartir la connexió a Internet activada els dispositius de la Raspberry i els ESP32 es connecten a l'ordinador. D'aquesta forma es pot canviar de xarxa sense haver de modificar la configuració d'usuari ni contrasenya de la programació MQTT, ja que aquests es connecten sempre al mateix ordinador. I el pc fa de *gateway* o porta d'enllaç a Internet. En cas de no voler utilitzar l'ordinador com a punt de connexió es podria configurar el mòbil com a router, i mantindríem l'avantatge no haver de canviar les configuracions de connexió cada vegada que canviem de xarxa. Una altra avantatge és que d'aquesta manera hi ha un control visual de quants dispositius estan connectats, si per exemple, per error la Raspberry Pi no es connectés al meu ordinador es detectaria ràpidament. (Figura 39).

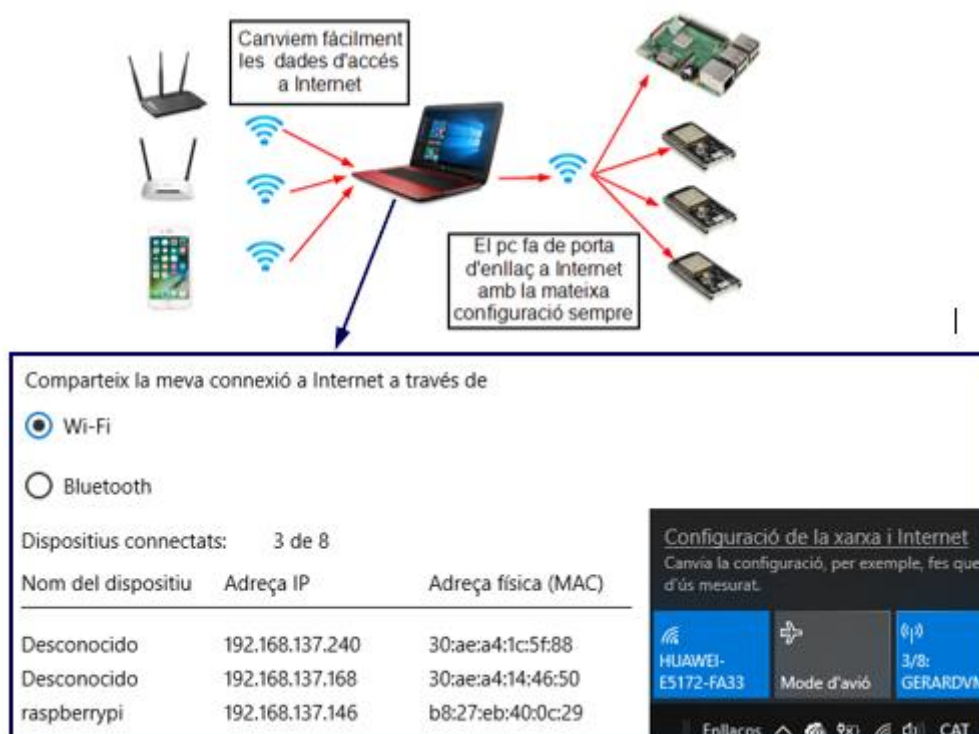


Figura 39. Connexió a Internet dels dispositius amb l'ordinador com a punt d'enllaç

Control del telescopi mitjançant el software planetari Stellarium

Fins ara s'ha explicat la primera opció de control del telescopi de forma remota, mitjançant una interfície d'usuari, on es controlen els motors prement botons digitals des d'un panell de control amb plataforma IoT. És una manera de posicionar el telescopi de forma "manual", i si es desitja enfocar un astre en concret és una tasca força entretinguda. És per això que s'ha dissenyat una segona via de control, on l'usuari pot posicionar el telescopi amb un simple clic sobre l'astre a visualitzar.

Aquesta segona forma de controlar el telescopi és utilitzant el programa planetari virtual de codi obert gratuït anomenat *Stellarium*. El software ha d'estar instal·lat a l'ordinador, a partir de les nostres dades de localització i hora ens mostra els punts cardinals i els astres que podem observar amb la limitació de l'horitzó, això ens permet prescindir d'incorporar un mòdul de GPS. Stellarium permet connectar muntures motoritzades comercials a través del port sèrie o amb un ordinador remot, introduint el model de telescopi, marca, etc. directament reconeix els drivers del software amb l'objectiu de controlar el dispositiu. En el nostre cas de fabricació pròpia haurem d'entendre com funciona el seu protocol de comunicació i idear un codi de programació capaç de rebre i enviar dades.

El protocol de comunicació que utilitza Stellarium és el LX200 i és ideal per connexions a través del port sèrie. Podríem connectar la Raspberry Pi o un dels ESP32 pel port sèrie per enviar i rebre dades mitjançant aquesta opció, però recordem que un dels objectius d'aquest projecte és tenir un **control remot** del telescopi. A la pàgina web oficial de Stellarium²⁸ s'explica les diverses formes de

²⁸Stellarium. (s.f.). Telescope Control (client-server). Visitat el 20 abril, 2019, de [http://stellarium.sourceforge.net/wiki/index.php/Telescope_Control_\(client-server\)](http://stellarium.sourceforge.net/wiki/index.php/Telescope_Control_(client-server))

comunicació que permet, i s'opta per l'opció de client-servidor mitjançant TCP/IP²⁹, ja que ens permetrà utilitzar un servidor de codi obert que faci d'enllaç entre els dispositius.

El que ens interessa és que Stellarium es connecti al nostre broker de la Raspberry, és per això que s'introdueix la ip de la Raspberry i s'escull un port TCP, concretament el 10002. Ara el software planetari espera poder transmetre dades a un port TCP 10002, caldrà configurar un port amb aquestes característiques al telescopi. (Figura 40).

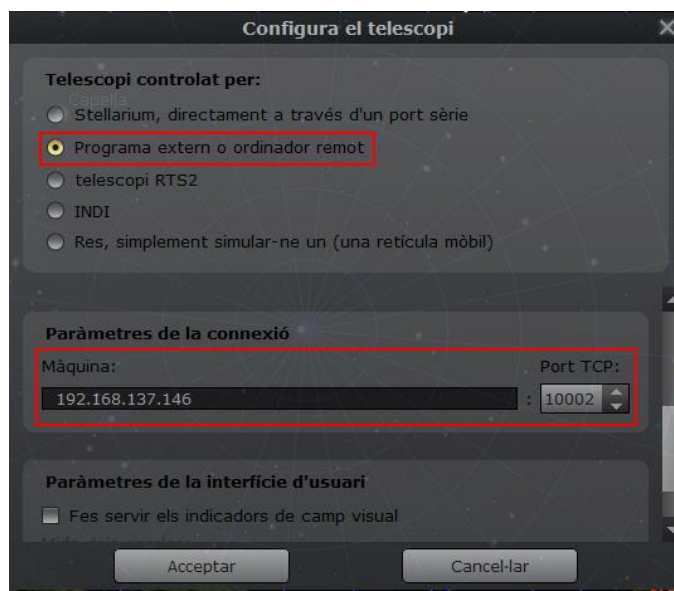


Figura 41. Configuració de la connexió de Stellarium mitjançant TCP/IP

Com ja s'ha comentat, Stellarium és un programari de codi obert i ofereix un programa escrit en llenguatge Python capaç de simular una connexió TCP/IP amb el protocol LX200. Es tracta d'una aportació d'autor anònim i ens permet establir una connexió sense dependre de tenir un telescopi comercial amb el seu corresponent software. Però això no ens soluciona la problemàtica de connectar-nos-hi remotament.

Comprensió del codi del servidor TCP/IP de Stellarium

Per tal de poder modificar el codi Python que permet simular una connexió TCP/IP amb Stellarium primer de tot s'ha de comprendre com està estructurat, el seu funcionament i el protocol de comunicació LX200.

Les coordenades que es reben des de Stellarium són **coordenades equatorials**. Això s'ha tingut molt en compte en el disseny mecànic del telescopi i és un dels motius pel qual s'ha escollit una muntura equatorial, si s'hagués optat per una muntura altazimutal tindriem ara la problemàtica de conversió de

²⁹ Protocol de Control de Transmissió, permet establir una connexió entre dos dispositius i l'intercanvi de dades garantint que els paquets no es perdin durant la transmissió i siguin entregats en el mateix ordre que han estat enviats. El TCP/IP és el protocol que utilitzen els ordinadors per comunicar-se per Internet i el port es tracta d'una numeració lògica que s'assigna a les connexions tant d'origen com de destí.

dades. Per una part en hagués facilitat el disseny i fabricació però en aquest punt que tractem en hagués dificultat enormement la tasca de comunicació.

Com ja s'ha comentat, el protocol LX200 es basa en la connexió servidor→client i un altre pel sentit contrari client→servidor. Aquest programa només ens servirà pel sentit client→servidor, on el client és Stellarium i el servidor serà el programa Python instal·lat a la Raspberry. La forma com el client Stellarium ens envia les dades la resumim a l'esquema següent:

RA=ascensió recta (J2000) → 4 bytes enters sense signe

Dades rebudes:

0x100000000 = 0x0 i significa 24h = 0h

0x080000000 significa 12h

DEC = declinació (J2000) →4 bytes enters amb signe

Dades rebudes:

-0x40000000 significa -90 graus

0x0 significa 0 graus

0x40000000 significa 90 graus

Taula 3. Esquema bàsic d'un missatge client (Stellarium)→Servidor (programa Python a la Raspberry)

Tots els valors es transmeten en format *little-endian* i pel seu tractament utilitza el tipus *ConstBitStream* de la biblioteca *python-bitstring*³⁰. Aquest programa Python està guardat amb el nom de *Telescope_server.py* a la Raspberry i permet mostrar per terminal les coordenades rebudes des de Stellarium.

Aquest programa-servidor crida a un altre codi Python anomenat *coords.py*. El que realitza aquest codi és executar funcions auxiliars per la conversió de dades com poden ser: *coords.rad_2_stellarium_protocol* o *coords.hourStr_2_rad*, que permeten convertir les coordenades rebudes amb el protocol LX200 a radians. Des del programa principal *telescopi_server.py* crida aquest arxiu *coords.py* com a mòdul mitjançant l'expressió *import coords*.

³⁰ Aquesta biblioteca es troba disponible a code.google.com sota la llicència del MIT i la seva *Open Source Initiative*, i permet un tractament flexible i intuïtiu de les dades a nivell de bits en Python.

Modificació del simulador de connexió TCP/IP amb incorporació de MQTT

Un cop entès el funcionament del programa escrit en Python que simula la connexió TCP/IP ha arribat el moment de modificar-lo per dotar-lo d'una connexió MQTT i així aconseguir executar-lo des del Node-RED. Amb això podrem aconseguir l'objectiu de rebre les dades remotament i no per connexió en sèrie.

L'arxiu que modificarem és el *coords.py* i el primer que hem de fer és instal·lar a la Raspberry el programari *Paho* que permet utilitzar llibreries MQTT en qualsevol llenguatge de programació, inclòs el Python que és el que necessitem:

```
import paho.mqtt.client as mqtt
```

De la mateixa forma que s'ha establert una connexió MQTT amb el broker des dels ESP32, procedim de la mateixa manera amb el codi Python i establim un *localhost* perquè aquest programa està instal·lat a la Raspberry Pi igual que el broker MQTT:

```
client = mqtt.Client()  
client.connect("localhost", 1883, 60)
```

Ara només ens queda identificar la funció del codi que permet llegir les coordenades que s'envien des de Stellarium, però un cop el programa les ha transformat segons el protocol:

```
def rad_2_stellarium_protocol(ra, dec):
```

En aquesta funció afegirem dues línies de codi:

La primera per emmagatzemar a una variable que anomenem "tornada" el codi en format JSON, i que contindrà les coordenades en format *string*³¹ per tal de complir amb les normes del protocol MQTT³²:

```
tornada = "{\"ra\": "+str(ra_h)+", \"dec\": "+str(dec_d)+"}"
```

La segona línia contindrà la publicació del missatge, que es tractarà de la variable "tornada". I es publicarà en un *tòpic* concret per tal de ser rebut pel client que es subscriu a aquest mateix tòpic:

```
ret= client.publish("topic/position",tornada)
```

Ara només ens falta introduir el mateix port TCP/IP que s'ha configurat a Stellarium, el 10002. Aquest s'ha de programar a l'arxiu *telescopi_server.py* que és on hi ha la funció que estableix les connexions:

```
def __init__(self, port=10002):
```

³¹ Cadena de caràcters.

³² Si no s'envien les dades en format JSON no es compleix la normativa del protocol de comunicació MQTT i aquestes no s'enviaran remotament des de Stellarium al broker instal·lat a la Raspberry.

Configurem nodes al Node-RED per tal de rebre les dades des del programa Python servidor, poder-les transformar amb un node JSON i enviar-les per MQTT a l'ESP32 n°1 encarregat de moure els motors dels eixos. (Figura 42).

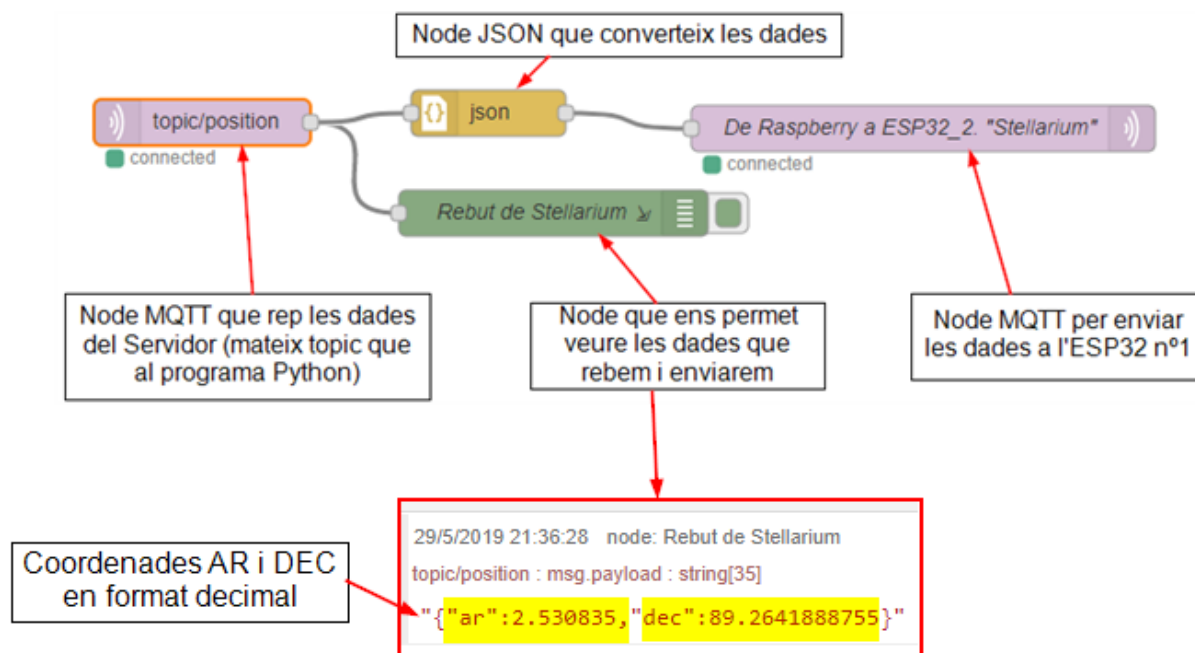


Figura 42. Node-RED, nodes per rebre les coordenades des de Stellarium, visualitzar-les i enviar-les per MQTT als motors.

Amb aquestes modificacions i configuracions hem aconseguit el següent, esquematitzat a la figura 42:

- ✓ Introduir el mateix port TCP/IP que tenim a Stellarium per tal de comunicar els dos programes.
- ✓ Capacitar un arxiu de Python de comunicació MQTT.
- ✓ Adequar les coordenades rebudes des de Stellarium al protocol de comunicació MQTT.
- ✓ Visualitzar les coordenades equatorials, AR i DEC, al Node-RED instal·lat a la Raspberry Pi.
- ✓ Enviar aquestes coordenades per MQTT (remotament) al broker, que gràcies al *tòpic* podrà reenviar-les al *client* que s'hi subscriu.

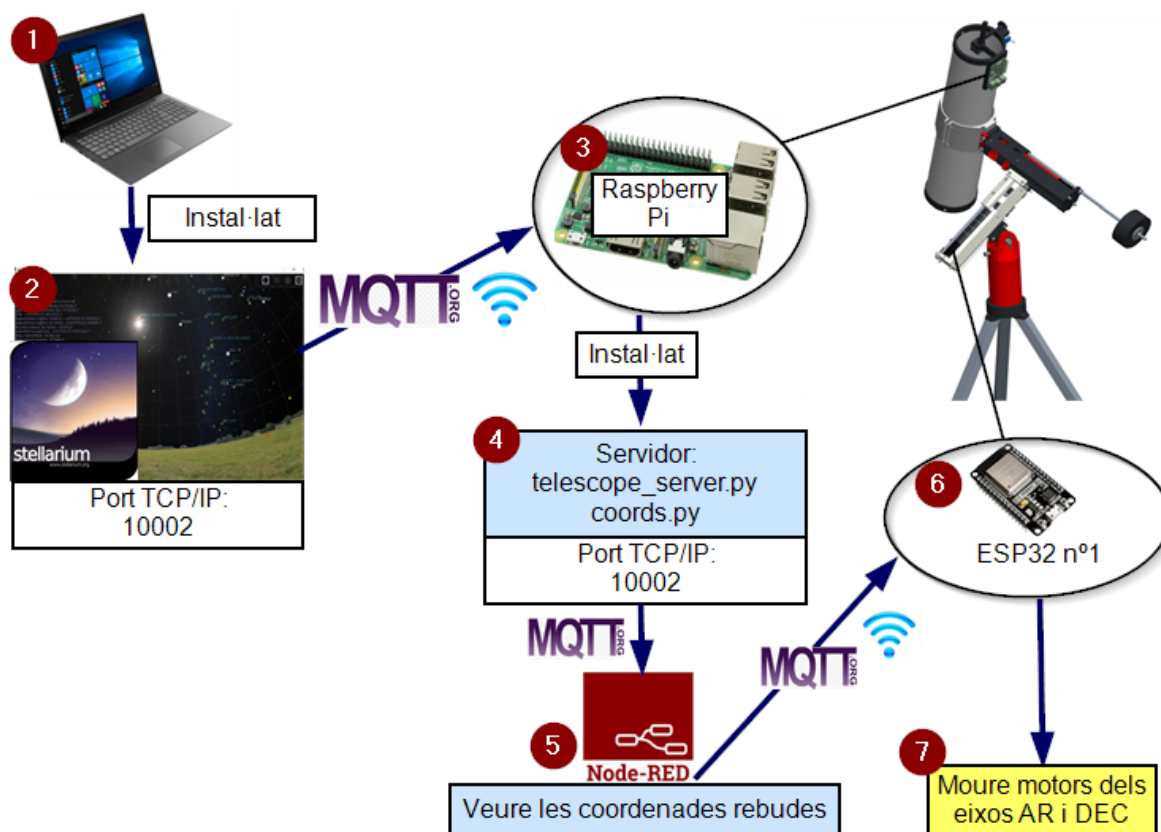


Figura 43. Esquema de comunicació entre Stellarium, RaspberryPi, Servidor, Node-RED, ESP-32 i els motors

Posició de referència inicial del telescopi

Abans d'explicar la programació dels motors per tal de posicionar el telescopi a les coordenades seleccionades des de Stellarium, és molt important tenir un punt d'origen inicial de posicionament.

Igual que s'ha de realitzar amb tot telescopi i, sobretot motoritzat, s'ha de situar el tub enfocant un punt de la regió celeste que sigui com l'origen de coordenades. Aquest punt ha de ser el Nord Celeste que en coordenades equatorials equival el **AR: 0h i DEC: 90°**. Però com es pot enfocar en aquest punt imaginari? Doncs al estar situats a l'hemisferi Nord Terrestre, podem referenciar-nos amb un astre molt pròxim a aquestes coordenades i que sigui visible, es tracte de **l'estrella Polar**. Aquesta té unes coordenades AR: 2h, 31min, 51s i DEC: 89°, 15', 4" i la utilitzarem com a posicionament de partida.

Un cop tinguem l'estrella Polar centrada a la imatge del telescopi, polsarem el botó digital de la interfície d'usuari anomenat *Polar*. Aquest iniciarà una seqüència que enviarà les coordenades de l'estrella Polar al codi de l'ESP32 n°1 indicant-li que ja està posionat correctament per començar una comunicació entre Stellarium i el nostre telescopi.

Amb això aconseguim situar sempre d'inici de la sessió el telescopi a l'origen de les nostres coordenades, que correspon a posicionar-lo a l'estrella Polar. (Figura 44).

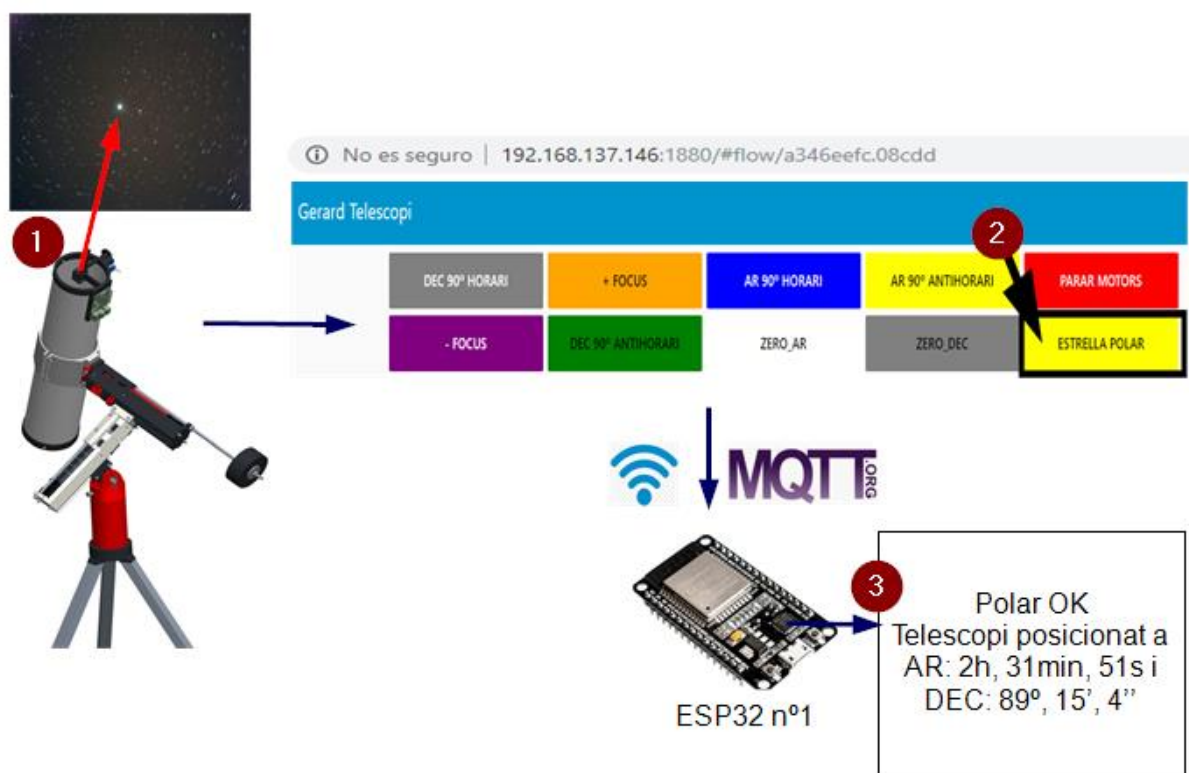


Figura 44. Posicionament de referència inicial del telescopi

A l'apartat de *posada en pràctica* explicarem que prèviament a buscar la posició de referència amb la Polar és imprescindible establir el telescopi i situar l'eix AR paral·lel a l'eix de la Terra. Sense això no aconseguiríem realitzar el seguiment d'un astre, només el visualitzaríem durant un temps limitat.

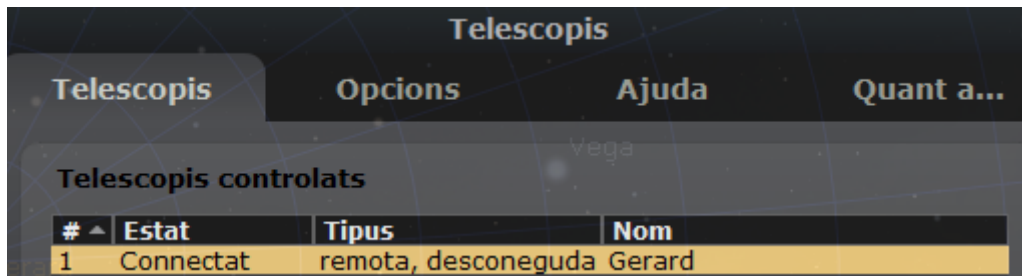
Posicionament del telescopi amb les coordenades enviades des de Stellarium

Ara que ja tenim una connexió remota entre Stellarium i el telescopi, és moment de programar l'ESP32 n°1 i n°2 encarregats de moure o aturar els motors. Aquests reben les dades mitjançant MQTT en format decimal i les haurem de transformar en l'equivalència de passos que ha de girar el motor, tenint en compte el reductor dissenyat i la posició de referència inicial de la Polar.

Primer de tot inicialitzarem el servidor del telescopi de codi Python que hi ha a la Raspberry des del Node-RED:



Automàticament podem comprovar com a Stellarium hi tenim la connexió remota per TCP/IP inicialitzada:



Seleccionem l'astre que volem visualitzar, per exemple l'estel Capella, i premem les dues tecles a la vegada de **Ctrl+1**. Veurem com apareix un cercle al voltant de l'astre amb el nom del nostre telescopi remot (Gerard), això significa que s'ha seleccionat un astre i que les dades han estat enviades al telescopi:



Les coordenades de l'estel seleccionat s'envien per MQTT al broker Mosquitto instal·lat a la Raspberry i les visualitzem pel Node-RED transformades a format decimal:



Aquestes coordenades a més de visualitzar-les a través del Node-RED, s'envien per MQTT a l'ESP32 n^o2, ja que aquest està subscrit al mateix tòpic. Recordem que l'ESP32 n^o 2 és l'encarregat de parar els motors. Aquest rep tot el missatge en forma de *payload* i n'extreu per una part les coordenades de l'AR, i per altra banda les coordenades DEC. Ara que ja les ha separat, envia per MQTT les coordenades AR i DEC a l'ESP32 n^o1 encarregat de moure els motors. S'envien les coordenades AR sota el tema "esp32/ar" i les DEC sota el tòpic "esp32/dec", llavors l'ESP32 n^o2 inicia primer la funció de posicionament de l'eix DEC. Un cop l'eix DEC ja assolit la posició de la coordenada, arriba el torn de moure l'eix AR de la mateixa manera. S'ha restringit el moviment dels dos motors a la vegada, és a dir, si un motor està engegat, l'altre ha d'estar apagat, per tal de limitar les vibracions i tenir un control més conservador del dispositiu. Quan els eixos assoleixen les coordenades, els motors es paren, representa que tenim el telescopi ja posicionat a l'estel que havíem seleccionat des de

Stellarium i ho comprovarem observant el vídeo en directe des de la plataforma d'usuari. Llavors es poden comandar els botons digitals de *+Focus* i *-Focus* per enfocar la imatge que s'està visualitzant fins a tenir una imatge nítida.

La seqüència no acaba a aquí, automàticament l'eix AR inicia la rutina de seguiment de l'astre sense que l'usuari hagi fet res més des de que ha clicat sobre l'estel a Stellarium. Aquest seguiment consisteix en moure l'eix AR a una velocitat angular igual al de la Terra, d'aquesta manera s'aconsegueix tenir l'astre a la pantalla de visualització sense que desaparegui degut al moviment de rotació de la Terra.

Mètode de comptar els passos del motor per posicionar el telescopi

Un cop explicada la seqüència que es segueix des de que es clica sobre l'estel a visualitzar des del planetari virtual fins que s'hi posiciona el telescopi, ens centrarem a comprendre els càlculs realitzats per tal de donar les instruccions exactes als motors.

S'ha aprofitat el gran avantatge d'haver dissenyat un sistema de reducció del motor que permet tenir una resolució dels passos força elevada. Per tant, per donar les ordres als motors de quants radiants han de girar i en quin sentit s'ha utilitzat el mètode de comptar els passos.

Partim sempre de les coordenades de l'estrella Polar, que són el nostre origen de coordenades. Tant les coordenades DEC com AR les convertim a format decimal (*float*) per poder-les tractar. A continuació veurem un exemple on es resumeix la seqüència seguida per anar des de l'estrella Polar a l'estrella Vega. Ens centrarem en les coordenades AR:

Coordenades decimals de l'estrella Polar (AR) → 2,530835 h

Coordenades decimals de l'estrella Vega (AR) → 18,615555 h

A continuació realitzarem la diferència entre la coordenada on tenim apuntant el telescopi i la coordenada de l'astre on volem moure'l:

$$\text{Diferència entre coordenades} = 2,530835 - 18,615555 = -16,08472 \text{ h}$$

El signe ens indica que haurem de moure l'eix AR del telescopi en sentit antihorari.

Ara ens falta conèixer quants polsos haurem d'ordenar que realitzi el motor, però primer és obligatori calcular l'equivalència entre un pas del motor i un arcsegon de les coordenades equatorials:

$$\text{Temps de rotació de la Terra} = 86.400 \text{ s/volta}$$

$$\text{Número de passos del meu motorreductor} = 356.844 \frac{\text{passos}}{\text{volta}}$$

$$\frac{86.400}{356.844} = 0,24212 \frac{\text{s}}{\text{pas}}$$

Per tant, amb 1 pas del motor, es recorre 0,24212 arcsegons.

Com que tractem les unitats en segons i arcsegons, convertim el recorregut calculat a segons:

$$-16,08472 \text{ h} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = -57.904,992 \text{ s}$$

Ja podem calcular quants passos ha de realitzar el motor:

$$\text{Passos a realitzar el motor AR} = \frac{-57.904,992 \text{ s}}{0,24212} = -239.158,2356 \text{ passos}$$

Només queda realitzar una seqüència de programació que ens garanteixi que el motor no es parará fins assolir aquest número de passos calculat o que l'usuari premi el botó d'aturada.

Un cop finalitzada la seqüència s'actualitza la posició actual i s'envia per pantalla per comprovar que realment s'ha assolit les coordenades AR amb el següent algoritme:

$$\text{Posició actual} = (\text{posició anterior}) - \left(\frac{\text{número de passos realitzats} * 0,24212}{3600 \text{ s}} \right)$$

Equació 11. Càlcul de la posició final d'un eix del telescopi pel mètode de comptar passor del motor

La *Posició actual* ha de coincidir exactament amb les coordenades de l'estrella Vega de 18,615555 h, que ens germanitzarà la correcta posició de l'eix AR del telescopi.

A continuació es realitzaria el mateix per l'eix DEC, procedint de forma semblant a l'explicada en l'eix AR. Un cop tenim els dos eixos posicionats a l'estrella, automàticament comença la seqüència de *tracking*, que consisteix en seguir l'estrella contrarestant la velocitat de la Terra. D'aquesta forma sempre es pot observar l'astre al llarg del temps.

Recordem que gràcies a tenir una muntura equatorial només caldrà moure l'eix AR a velocitat constant per realitzar el seguiment de qualsevol astre. Si en canvi, haguéssim optat per una muntura altazimutal, seria molt complex i amb una alta probabilitat d'errors. Hauríem de moure els dos eixos a la vegada i corregint posicions contínuament, a més, no ens valdrien les coordenades equatorials que ens proporciona Stellarium, hauríem de fer-ne la conversió mitjançant trigonometria esfèrica.

L'avantatge de tenir un reductor de 1781,76:1 és que ens permet poder girar els eixos a una velocitat angular de 0,11786 rpm ($1,23454 \cdot 10^{-2}$ rad/s) i obtenir un parell motor màxim a la sortida del reductor de 534,40 Nm. (Equacions 8, 9 i 10). Però tot i obtenir una velocitat angular força lenta, no és prou lenta per contrarestar la velocitat de rotació de la Terra de $6,96 \cdot 10^{-4}$ rpm de forma constant. Per solucionar-ho s'ha optat per realitzar un número determinat de passos del motor cada segon.

$$1 \text{ volta de la Terra en arcsegons} \rightarrow 360 \text{ graus} * \frac{60 \text{ arcmin}}{1 \text{ grau}} * \frac{60 \text{ arcsegons}}{1 \text{ arcmin}} = 1.296.000 \text{ arcsegons}$$

$$\text{Velocitat de rotació de la Terra en arcsegons} \rightarrow \frac{1.296.000 \text{ arsegons}}{86.164 \frac{\text{segons}}{\text{volta}}} = 15,04108 \frac{\text{arcsegons}}{\text{s}}$$

$$\text{Passos del motoreductor per volta} = 356.844 \frac{\text{passos}}{\text{volta}}$$

$$\text{Número de passos per segon} \rightarrow \frac{15,04108}{3,63184} = 4,14145 \frac{\text{passos}}{\text{s}}$$

Equació 12. Càlcul del número de passos del motoreductor per contrarestar la velocitat de la Terra

Per tant, el motor ha de realitzar 4,14145 passos cada segon per contrarestar la velocitat de la Terra. Ja que no realitzem fraccions de passos per tal de no perdre precisió ni parell motor, utilitzarem un comptador de temps que sí podem fraccionar-ne les unitats. Així, **el motor durà a terme 4 passos**

cada 965.85 ms. D'aquesta forma l'eix AR girarà a la mateixa velocitat que la Terra i podrem fer un seguiment automatitzat dels astres.

Quan des de Stellarium es seleccioni el següent astre a visualitzar, s'interromprà la seqüència de *tracking* per tornar a seqüenciar totes les funcions anteriors.

Disseny electrònic

El telescopi està controlat principalment per la Raspberry Pi, és on està instal·lat el *broker* i és l'encarregada d'enviar les ordres als dos microcontroladors ESP32. La Raspberry està instal·lada a la part del tub, d'aquesta forma pot estar connectada a la càmera que emet les imatges captades pel mirall. La Raspberry es comunica per MQTT amb els seus clients ESP32, d'aquesta forma no hi ha cap instal·lació de cablejat entre ells, evitant el perill que suposaria que s'enredessin els cables quan els eixos estan en rotació. L'alimentació de la Raspberry està proporcionada per una bateria de liti i polímer³³, de 3800 mAh i 5,1±0,1V de sortida. Tenint en compte que des de la Raspberry s'alimenta el motor pas a pas que permet moure el mecanisme pinyó-cremallera i també la càmera, aquesta bateria ens proporciona un funcionament d'unes 3 h.

La resta d'instal·lació es troba a la caixa elèctrica. Aquesta conté els dos ESP32, els controladors dels motors i un convertidor de DC-DC per la part de potència.

Controladors dels motors

Un controlador o *driver* ens permet limitar el corrent que circula pel motor i ens proporciona una protecció per tal d'evitar que el motor pugui malmetre's.

Utilitzem dos controladors **DRV8825**, un per cada motor pas a pas que controla l'eix AR i DEC del telescopi. Pel seu control s'utilitzen dues sortides digitals connectades al microcontrolador ESP32 número 2, l'encarregat del control dels motors. Una sortida és per indicar el sentit de gir i l'altra per comunicar que el motor avanci un pas. També ens permetria realitzar *microstepping*, però com ja s'ha explicat anteriorment no ho utilitzarem per tal de no perdre passos ni parell motor. Les característiques del controlador DRV8825 es poden observar a la taula 4.

Model	DRV8825
Intensitat màxima	2,5 A
Tensió màxima	45 V
Microsteps	32

Taula 4. Característiques principals del controlador motor DRV8825

Per tal d'escollir aquest controlador s'ha tingut en compte les característiques dels dos motors pas a pas, principalment la tensió d'alimentació de 12V i un corrent nominal de fase de 1,7 A. Podem comprovar a la taula 4 que la tensió màxima del controlador és de 45 V, molt superior als 12 V del motor i que la intensitat màxima del controlador també és superior a la intensitat nominal de fase del motor.

³³ També anomenades tipus "lipo".

Una característica molt important a tenir en compte amb aquest controlador és la regulació de la intensitat, degut a que els motors necessiten tensions superiors a les que podrien suportar les bobines pel seu corrent nominal. Si no utilitzéssim aquest regulador, per la llei d'Ohm calculem el corrent que circularia per una de les bobines del motor de $1,5 \Omega$ de resistència per fase:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12 V}{1,5 \Omega} = 8 A$$

Si apliquéssim directament aquest 8 A fariem malbé el motor en poc temps. És per aquest motiu que el controlador incorpora un limitador d'intensitat, el qual permet alimentar el motor a tensions nominals superiors a les que és possible per la seva resistència i intensitat màxima admissible. No obstant, la llei d'Ohm s'ha de complir, per tant, com actua el controlador? Doncs el limitador interromp la senyal proporcionant una senyal polsada PWM de tal forma que el valor mitjà de la intensitat que travessa la bobina és la intensitat nominal del motor. Per exemple, el limitador de tensió aplicaria el pols durant un 15% del temps i mantindria el motor apagat el 85% restant³⁴. Per regular la intensitat que proporciona el limitador i ajustar-lo al valor requerit pel motor, el controlador disposa d'un potenciòmetre. Per ajustar aquest potenciòmetre s'ha calculat la tensió de referència mitjançant la fórmula extreta del *datasheet* del controlador DRV8825:

$$I_{m\grave{a}x} = 2 * V_{ref} \rightarrow V_{ref} = \frac{I_{m\grave{a}x}}{2} = \frac{1,7 A}{2} = \mathbf{0,85 V}$$

Segons el *datasheet*, al utilitzar pas complet (*full step* i no *microstepping*) el corrent ha de ser un 71%, per tant:

$$V_{ref} = 0,71 * 0,85 = \mathbf{0,60 V}$$

Equació 13. Càlcul de la tensió de referència pel ajustatge del controlador del motor

Per tant, el voltatge límit que s'ha d'ajustar al potenciòmetre del controlador és de 0,60 V.

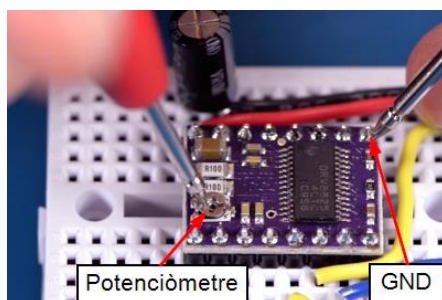


Figura 45. Procediment utilitzat per mesurar la tensió de referència amb el multímetre

³⁴ A aquest mecanisme de limitació de la intensitat se'l denomina *Chopping*.

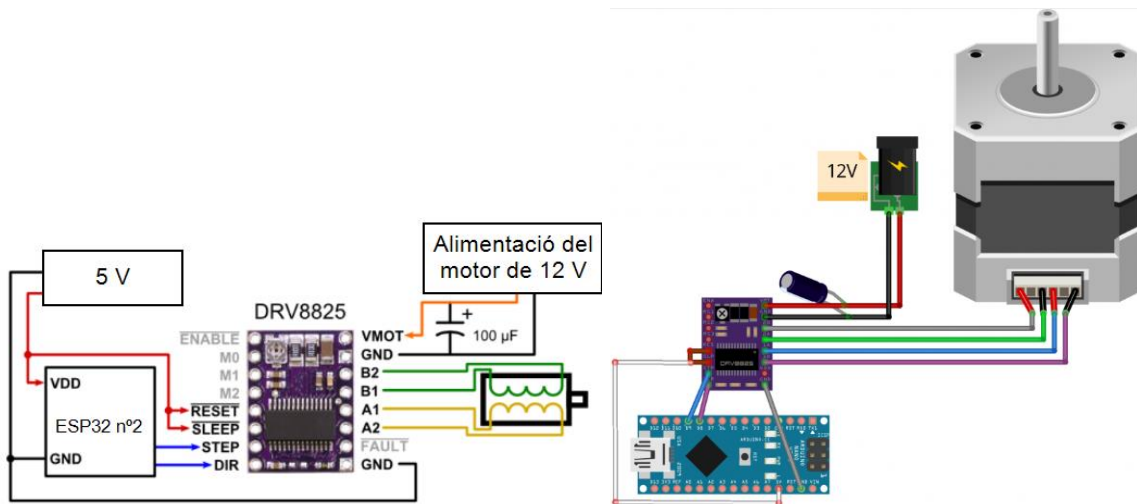


Figura 46. Esquema de la connexió del motor amb el driver, el microcontrolador ESP32 i la font d'alimentació

Sensors

Els sensors utilitzats en aquest projecte són dos sensors hall, un sensor d'unitat de mesura inercial (IMU) de 6 graus de llibertat i un altre IMU però de 9 graus de llibertat. Els sensors hall utilitzats per posicionar els eixos inicialment ja s'han explicat anteriorment, per tant, ens centrarem a explicar els sensors IMU.

Un sensor d'unitat de mesura inercial és un dispositiu electrònic que mesura la velocitat, orientació i forces gravitacionals utilitzant la combinació d'un acceleròmetre, un giroscopi i un magnetòmetre. Quan parlem d'un IMU de 3 DOF ens referim que disposa de 3 graus de llibertat i format per un acceleròmetre. En el nostre cas hem utilitzat un IMU de 6 DOF, per tant, de 6 graus de llibertat amb un acceleròmetre i un giroscopi. Aquest s'ha instal·lat a la muntura del telescopi, concretament a l'element de subjecció de l'eix AR, i ens permet mesurar l'angle d'inclinació. (Figura 47).

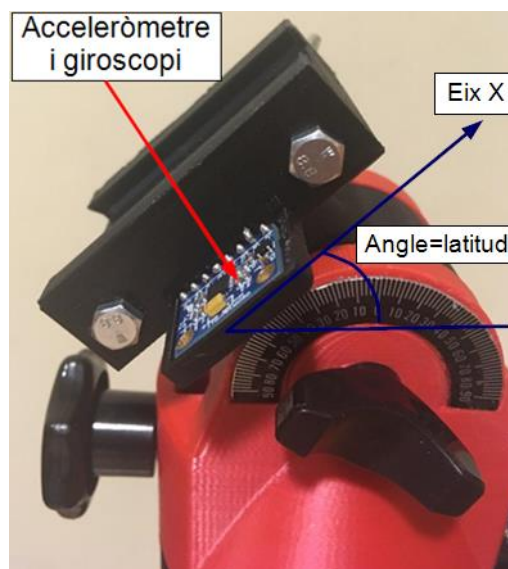


Figura 47. MPU-6050, sensor amb acceleròmetre i giroscopi utilitzat per mesurar la inclinació de l'eix AR.

Aquest acceleròmetre i giroscopi es tracta del model MPU-6050. L'alimentem a 5 V i consumeix un màxim de 3,5 mA, l'hem escollit perquè executa complexos algorismes per combinar les mesures dels sensors interns i ens evita haver de realitzar els filtres de forma externa.

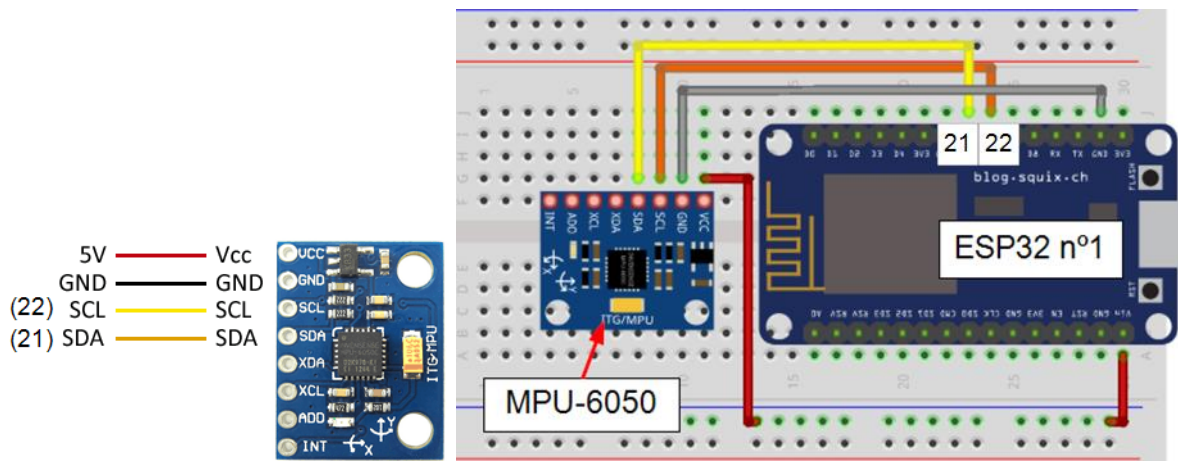


Figura 48. Connexió del sensor MPU-6050 per mesurar la inclinació a l'ESP32 n°1

La forma com hem programat aquests sensors IMU és combinant les mesures de l'acceleròmetre i del giroscopi amb un filtre complementari. Això ens proporcionarà resultats més precisos que utilitzant només l'acceleròmetre o el giroscopi per separat. Aquest filtre complementari és una simplificació del famós filtre de *Kalman*³⁵, que prescindeix de l'anàlisi estadístic per tal d'agilitzar el processament de les dades des dels microcontroladors. Aquest filtre es comporta com un filtre de passa altes per la mesures del giroscopi i un filtre de passa baixes per les senyals de l'acceleròmetre, és a dir, la senyal del giroscopi mana a curt termini i la de l'acceleròmetre a mig i llarg termini, que és exactament el que volem per compensar els seus avantatges i defectes. El filtre s'ha programat en la seva expressió més senzilla. Prenent com a valor de les constants A i B de 0,98 i 0,02 respectivament (han de sumar 1):

$$\theta = A \cdot (\theta_{prev} + \theta_{gyro}) + B \cdot \theta_{accel}$$

Recordem que aquest angle d'inclinació ha de ser el mateix que la latitud on es troba el telescopi, per exemple si estem situats a Vic, la latitud és de 41° 55' 27" N, que convertint les dades a decimal obtenim 41,92°. Per tant, la inclinació que hem de garantir és de 42° en l'eix X del sensor.

L'altre sensor de sensor d'unitat de mesura inercial utilitzat és el MPU-9250 de 9 DOF, és a dir, de 9 graus de llibertat i a més d'incorporar un acceleròmetre i un giroscopi disposa d'un magnetòmetre. Aquest sensor l'utilitzarem per mesurar la inclinació del trípede i orientar-lo al Nord. Amb la inclinació del trípede volem garantir que estigui paral·lel al terra, és molt important pel calibratge inicial i poder realitzar seguiment dels astres. Aquest paral·lelisme el mesurarem amb el mateix mètode explicat

³⁵ Desenvolupat el 1960 per Rudolf E. Kalman i és considerat un dels grans descobriments del segle XX per les seves implicacions en el procés de filtre en sensors i és un dels artífexs de la cursa espacial. Font: Brown, R. G. and P. Y. C. Hwang. 1992. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc

amb el sensor anterior MPU-6050, però a més de l'eix X també l'eix Y. Els dos eixos per separat han de mesurar 0° per ser exactes en tenir una base totalment plana. (Figura 77).

El magnetòmetre ens servirà per posicionar el telescopi orientat al Nord magnètic. Com que les dades que obtindrem són pels tres eixos (x, y, z) només ens interessen els paral·lels al terra, per tant x, y. El valor ha de ser la combinació dels dos per tenir una mesura de quants graus estem respecte el Nord, per això s'aplica la tangent dels dos angles.



Figura 49. MPU-9250, sensor per mesurar que el trípode està paral·lel al terra i garantir que està posicionat al Nord.

Per visualitzar les dades proporcionades per aquests dos sensors s'ha utilitzat la interfície d'usuari IoT del Node-RED *dashboard*. Igual que amb la resta de control del telescopi, amb la diferència que ara el sentit de la comunicació MQTT és des dels sensors als microcontroladors ESP32 i d'aquests al *broker* instal·lat a la Raspberry Pi que visualitza els valors al panell de control. És el sentit contrari al que tenim amb el comandament dels motors, on la comunicació va des de que l'usuari pulsa el botó al panell de control, el *broker* envia les ordres des de la Raspberry Pi als microcontroladors ESP32 i d'aquests als motors. (Figura 50).

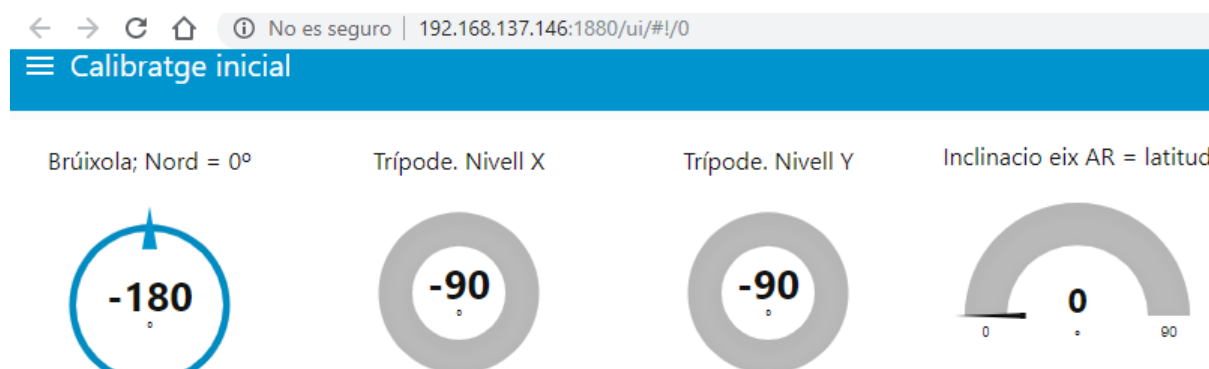


Figura 50. Panell de control IoT utilitzat per mostrar els valors de les mesures dels sensors IMU

Caixa elèctrica

Els dos microcontroladors ESP32 i els controladors dels motors estan instal·lats a una placa i protegits dins d'una caixa elèctrica feta a mida. En aquesta instal·lació també hi ha tota la part de potència del telescopi, a excepció de l'alimentació dels components del tub que tenen la seva pròpia bateria com ja s'ha explicat anteriorment.

Els requisits de potència del telescopi estan principalment basats en la demanda dels motors, la resta de components són els sensors i tenen consums molt inferiors. Cada motor necessita 12V i 1,7A i s'ha de tenir en compte que per programació només permetem moure un motor a la vegada. La limitació de corrent ens la marquen els controladors dels motors que màxim admeten 2,5 A, és per això que la potència del telescopi està proporcionada per una font de 12 V i 2 A. Aquesta font d'alimentació és un **transformador** de 220 V AC a 12V DC, d'aquesta forma es pot utilitzar el telescopi com la majoria d'aparells electrònics connectats a un endoll domèstic. És molt pràctic per un ús en interior, però té la limitació de no poder-lo utilitzar si anem a camp obert sense endolls, és per això que disposem d'una font alternativa que consisteix en una **bateria** de plom àcid de 12 V DC i 7Ah, la qual ens proporciona corrent durant unes 3 h. S'ha escollit aquest tipus de bateria pel seu cost reduït de 16 €, tot i que té un pes de 2 kg.

Els 12 V ens permeten alimentar els controladors dels motors que limiten el corrent als motors, però els microcontroladors ESP32 requereixen una alimentació de 5V, és per això que s'ha instal·lat també un convertidor DC-DC. Aquest transformador li arriben els 12 V de la font d'alimentació i s'ha regulat el potenciòmetre per tal que a la sortida hi hagi una tensió de 5 V. Amb aquests 5 V alimentem els dos ESP32 i tots els sensors: els dos sensors hall i els dos sensors d'unitat de mesura inercial.

A la caixa elèctrica s'hi ha instal·lat dos ventiladors de 12V que proporcionen una adequada refrigeració a tots els components electrònics instal·lats a la placa. El *datasheet* dels controladors dels motors recomanen instal·lar radiadors de refrigeració muntats directament sobre el xip en cas d'utilitzar un corrent de més de 1,5 A i per valors superiors a 2,2 A ens recomana utilitzar refrigeració externa. Tenint en compte que el corrent utilitzat és de 2 A i que els components estan dins d'una caixa es creu convenient utilitzar aquesta refrigeració proporcionada pels dos ventiladors.

Aquesta caixa elèctrica es pot muntar i desmuntar fàcilment al telescopi, ja que s'ha aprofitat l'espai que hi ha quan s'obren les potes del tríode per fixar-la mitjançant un cargol de M6 als tensors plegables de les potes.



Figura 51. Caixa elèctrica amb els dos ventiladors de refrigeració

Capítol 4. Conclusions

La planificació prèvia i l'estratègia a seguir han estat fonamentals per assolir els objectius del projecte en el termini establert, així com dividir el projecte en parts, dates límits i objectius de menys a més dificultat en el temps. S'ha tingut en compte la filosofia *Agile* per intentar fabricar ràpids prototips de les parts més importants, i que aquestes permetessin validar les teories que des de només el punt de vista del disseny no haguessin estat suficients.

S'ha aconseguit el propòsit de fabricar un telescopi majoritàriament format amb impressió 3D, on la mecànica és imprescindible, sobretot en el reductor epicicloidal que s'ha re-dissenyat i fabricat fins a 4 vegades. Dotar de moviment controlat tot el conjunt era un repte, que es va dividir en dos graus de dificultat. El primer era controlar-lo des d'una interfície d'usuari amb botons digitals i el segon des de Stellarium. El segon es plantejava com una millora només si es disposava de temps i també s'ha aconseguit aplicar. La combinació d'aquesta part mecànica amb la part de comunicació, programació i electrònica donen significat a l'objectiu principal d'aquest treball: un telescopi mecatrònic.

Per aquest projecte vaig prendre la decisió de comprar-me una impressora 3D. Ha estat requisit imprescindible aprendre el bon funcionament d'aquesta i m'ha permès realitzar dissenys creatius, però també aprendre a dissenyar preveient la bona fabricació de cada peça, la importància de les toleràncies i la seva geometria segons el tipus d'esforç a suportar. Dominar el software de dibuix 3D *Creo Parametric 5* prèviament a aquest treball m'ha permès ser àgil en el disseny de tot el telescopi i complir amb els terminis plantejats, tot i els inconvenients apareguts en les fases experimentals.

Integrar la càmera dins del tub i prescindir de mirall reflector secundari també era una incògnita. Aquesta idea ja s'ha explicat que no és pròpia, està basada en el principi de focus primari, però convertir aquesta idea a la pràctica i veure que funciona correctament m'ha permès seguir endavant amb el projecte. Tot i que s'ha obtingut bons resultats de dia, no s'ha pogut provar correctament de nit, degut a la falta de temps per fer proves i la dificultat de posicionar el tub en un astre en concret.

Ha estat molt important investigar sobre el funcionament i tipus de telescopis, sense això no s'haguessin tingut en compte molts factors decisius, com són els avantatges de la muntura equatorial en la part de comunicació tot i la dificultat en la fabricació. O també la importància del calibratge previ, que ens ha portat a la utilització de sensors de mesura inercial que permeten mesurar els angles entre els diferents components.

L'aplicació de l'assignatura de Sistemes encastrats m'ha permès aconseguir l'objectiu de controlar remotament el telescopi mitjançant el protocol de comunicació MQTT, molt important en l'àmbit d'Internet de les Coses. Que va molt lligat de tota la programació apresada durant el Grau, ja que s'han utilitzat diferents llenguatges de programació, com Python o C++.

Personalment estic molt satisfet dels resultats obtinguts, m'atreveixo a dir inclús que no veia realista arribar a assolir la majoria d'objectius. Tot i això, hi ha moltes coses que es poden millorar i donaran pas a un segon projecte.

Capítol 5. Possibles millores

Un cop finalitzat i provat el prototip són vàries les millores que es poden aplicar en un segon projecte:

- No es disposa de regulació de l'augment de la imatge obtinguda a través de la càmera. Tot telescopi disposa de diferents oculars amb augments, i no disposar d'ells ha fet molt complicat poder observar els astres de nit, on les imatges obtingues sempre han estat negres. Una solució seria incorporar una segona càmera sobre el tub, connectada amb un monocle de baix augment. Això ens permetria tenir una visió no tan augmentada i poder posicionar el telescopi més fàcilment.
- Poder regular per software la velocitat dels motors dels eixos. S'ha limitat la velocitat dels motors pas a pas a obtenir el parell màxim i evitar el possible les vibracions, sense que aquesta pugui ser modificada. Aquesta velocitat és força lenta i es tarda 6 minuts en girar un eix 360°. Seria una millora poder augmentar la velocitat sense afectar el bon funcionament del conjunt.
- Utilitzar un sensor magnetòmetre més precís i que no li afectés tant la instal·lació elèctrica ni les parts metàl·liques. El sensor utilitzat funcionava correctament abans de ser muntat al telescopi, un cop muntat les dades obtingues són errònies i no permeten posicionar el telescopi al Nord.
- Obtenir el posicionament del telescopi a temps real a Stellarium. S'ha aconseguit una comunicació remota mitjançant TCP/IP unidireccional, des de que es clica l'astre desitjat des del software fins que el telescopi es mou a aquesta posició. Però no s'ha aconseguit obtenir el retorn de quin recorregut està realitzant el telescopi fins a assolir l'astre seleccionat. Aquesta millora inclouria veure un cercle al software Stellarium corresponent al posicionament del tub.
- Utilitzar un sensor de mesura inercial format per un acceleròmetre i un giroscopi per posicionar el telescopi un cop seleccionat l'astre des de Stellarium, en comptes de realitzar-ho simulant un encoder comptant els passos del motor. La diferència seria que els motors estarien en funcionament fins que el sensor IMU estigués apuntant a les coordenades seleccionades, llavors s'enviaria l'ordre d'aturada dels motors.
- Utilitzar un ESP32 en comptes de dos. S'ha utilitzat dos ESP32 sobretot perquè un és l'encarregat d'aturar els motors enviant una senyal lògica a l'altre microcontrolador. L'ideal seria utilitzar interrupcions basades en sol·licitar el *callback* tot i tenir el programa en una rutina de bucle for, per exemple.
- Executar el servidor del telescopi que permet la comunicació entre Stellarium i la Raspberry automàticament des de l'arrencada del microprocessador. No s'ha fet així perquè el servidor deixava de funcionar al cap de poc temps, l'alternativa utilitzada és executar contínuament aquest servidor manualment, fet que el fan poc eficient.

Capítol 7. Bibliografia

Norton, R. O. B. E. R. T. L.. (s.f.). Diseño de máquinas. Madrid, España: Pearson.4a edición. (Última consulta 01/06/2019)

Shigley -. (s.f.). Diseño en ingeniería mecánica (8ª ed.). Madrid, España: Mc Graw Hill. (Última consulta 20/05/2019)

Dr. Ramón Jerez Mesa. Disseny de màquines. UVic. Apunts de l'assignatura disseny de màquines (Última consulta 25/05/2019).

Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi – Raspberry Pi. (s.f.-b). de <https://www.raspberrypi.org/> (Última consulta 22/05/2019)

Stellarium Astronomy Software. (s.f.-b) de <https://stellarium.org/es/> (Última consulta 15/05/2019)

PiKon. (s.f.-b) de <https://pikonic.com/> (Última consulta 20/04/2019)

ESP32 Overview | Espressif Systems. (s.f.-b)de <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview> (Última consulta 12/03/2019)

IBM Knowledge Center. (s.f.-b) de https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/ssw_aix_72/com.ibm.aix.networkcomm/tcpip_protocols.htm (Última consulta 12/03/2019)

The Prime Focus Method (Astrophotography) | Astronomy For Beginners. (s.f.-b). Recuperado 5 junio, 2019, de <https://www.astronomyforbeginners.com/astrophotography/the-prime-focus-method/> (Última consulta 5/01/2019)

Kitchin, C. R. (s.f.). Telescopes and Techniques. Berlín, Berlín: Springer. (última consulta 5/01/2019)

