



# **DETERMINACIÓ DE LA POSICIÓ A TRAVÉS DE GPS MITJANÇANT UN RECEPTOR SDR**

Pseudònim:

**Kuoppas**

Curs: 2022 - 2023

## Taula de continguts

<b>1. Abstract</b>	2
<b>2. Agraïments</b>	3
<b>3. Introducció</b>	4
<b>4. Objectius</b>	5
<b>5. Hipòtesi</b>	6
<b>6. Sistemes de navegació per satèl·lit</b>	7
6.1. Les ones	7
6.1.1. Característiques de les ones electromagnètiques	7
6.2. Els satèl·lits	9
6.3. Sistemes de navegació per satèl·lit	10
6.3.1. Galileo	11
6.3.2. Beidou	12
6.3.3. GLONASS	12
6.3.4. GPS	13
6.4. Determinació de la posició	17
6.5. Errors de mesura	19
<b>7. Ràdios definides per software</b>	23
7.1. Les ràdios	23
7.2. Les ràdios definides per software	28
7.2.1. Bias T	33
<b>8. Part pràctica</b>	34
8.1. Prova 1: Sintonització d'una emissora de ràdio	34
8.2. Prova 2: Determinació de la posició	37
8.3. Prova 3: Determinació de la posició en moviment i comparació amb el receptor d'un telèfon mòbil	45
<b>9. Conclusions del treball</b>	54
<b>10. Referències i fonts d'informació</b>	57
10.1. Fonts bibliogràfiques	57
10.2. Fonts digitals	57
<b>11. Annex 1: Taula comparativa de les característiques dels diferents sistemes de navegació per satèl·lit</b>	65

## 1. Abstract

El sistema GPS es el principal sistema de radionavegación empleado en todo el mundo, usado diariamente por millones de personas para conocer su posición. Una de las herramientas para captar señales GPS son las *software defined radio* (SDR). El presente estudio pretende determinar si es posible el montaje de un dispositivo SDR con esta finalidad, así como definir su precisión y fiabilidad. Por eso se ha analizado el funcionamiento de este sistema mediante una comparativa en movimiento con el receptor GPS implementado en un dispositivo móvil. Este trabajo llega a la conclusión que los aparatos SDR tienen una menor precisión que los teléfonos móviles, sobretodo provocado por un exceso en la sensibilidad a los obstáculos presentes en el entorno.

The GPS system is the main radionavigation system used worldwide by millions of people to pinpoint their position. One of the many tools to detect GPS signals are the so-called software defined radios (SDR). This study aims to determine whether it is possible to assemble an SDR device for this purpose, as well as to define its accuracy and reliability. Therefore, the performance of this system has been analyzed by a comparison with the GPS receiver implemented in a mobile device while moving. This work concludes that SDR devices provide a lower accuracy than cell phones, mainly caused by an excess in the sensitivity to obstacles present in the environment.

## 2. Agraïments

M'agradaria destacar les persones que m'han facilitat la realització d'aquest treball de recerca. Sense elles, no hauria estat possible.

En primer lloc, voldria agrair al meu tutor del treball de recerca pel seu seguiment que m'ha permès desenvolupar el meu treball correctament. Ha confiat en mi durant tot el procés i m'ha donat molta llibertat a l'hora de tenir les diferents parts del treball completades.

També mencionar el suport per part del meu assessor. Gràcies al seu coneixement i experiència en la matèria, m'ha permès resoldre les dificultats trobades en la part pràctica i poder seguir endavant en el projecte.

Per últim, reconèixer l'ajut proporcionat per la meva família, que m'ha donat tot el suport moral que requeria i més. Vull destacar especialment el meu pare, que ha estat allà sempre que l'he necessitat. Ha sigut ell qui ha tingut la paciència de passejar-me en cotxe dies i dies per recollir totes les dades que calien pel treball i en tot moment va mostrar interès incondicional per la causa.

A tots ells, moltíssimes gràcies.

### 3. Introducció

Aquest treball pretén aprofundir en el món de la navegació per satèl·lit, tecnologia nascuda als anys 60, però molt explotada a l'actualitat. Avui dia, gairebé tothom utilitza el cotxe per anar d'un lloc a un altre, guiant-se a través del navegador incorporat al vehicle. Avions i vaixells depenen d'aquesta innovació per arribar a la seva destinació de la manera més ràpida possible. A més, tots els telèfons mòbils inclouen un receptor per poder localitzar el dispositiu en qualsevol moment.

Totes aquestes aplicacions tenen un factor en comú: és necessària la implementació d'un receptor que permeti desxifrar i descodificar el senyal que arriba dels satèl·lits que orbiten al voltant de la terra. Per aconseguir-ho, es requereixen antenes i processadors que duguin a terme aquestes tasques. No obstant això, també es poden utilitzar les anomenades *Ràdios Definides per Software* o SDR, per les seves sigles angleses. Els receptors SDR permeten reduir tot l'equipament físic a només un programa informàtic.

## 4. Objectius

Aquest projecte s'estructura en tres parts principals. La primera se centra en els sistemes de navegació per satèl·lit, amb l'objectiu de conèixer els seus mecanismes d'acció, els mètodes per determinar de la localització d'un receptor i entendre el funcionament del GPS. La segona part es destina a l'estudi de les ràdios definides per *software* (SDR), per comprendre de quina manera es tracta el senyal respecte altres tipus de processos o ràdios. Finalment, el treball conclou amb la implementació pràctica d'un sistema SDR que tingui la capacitat per desxifrar la posició, tot posant a prova els coneixements adquirits anteriorment.

## 5. Hipòtesi

D'aquesta manera, es prepara una comparació entre un sistema SDR i el receptor GPS d'un telèfon mòbil, per comprovar que l'aplicació d'aquest sistema és útil, fiable, exacte i precís per ser usat en la vida quotidiana. Un dispositiu SDR podria arribar a substituir l'antena GPS incorporada en un telèfon mòbil? És més o menys precís? I en termes de fiabilitat?

És per això que s'intenta verificar que el conjunt de les funcionalitats del sistema de navegació GPS i d'un aparell SDR és d'un ús més recomanable que un telèfon mòbil, ja que és més efectiu i acurat.

## 6. Sistemes de navegació per satèl·lit

### 6.1. Les ones

Per entendre amb precisió com funciona un sistema de navegació per satèl·lit, primer cal conèixer el medi de transmissió de la informació: les ones electromagnètiques.

Una ona és un tipus de moviment en què només hi ha una transferència d'energia i quantitat de moviment, però no de matèria. Aquest també és l'anomenat moviment ondulatori i es pot classificar diferents tipus d'ones seguint diversos criteris. Alguns són els següents:

- Segons el medi de transmissió
  - Mecàniques: són aquelles que necessiten un medi de transmissió material.
  - Electromagnètiques: són aquelles que poden propagar-se al buit sense necessitat de cap medi de transmissió.
- Segons la direcció de propagació
  - Transversals: oscil·len perpendicularment a la direcció de propagació de l'ona.
  - Longitudinals: oscil·len en la mateixa direcció que la propagació de l'ona.

Així doncs, una ona electromagnètica (també anomenada radiació electromagnètica) és un tipus d'ona transversal composta per dues ones perpendiculars entre elles i perpendiculars a la direcció de propagació: una ona elèctrica i una ona magnètica. (Fig. 1)

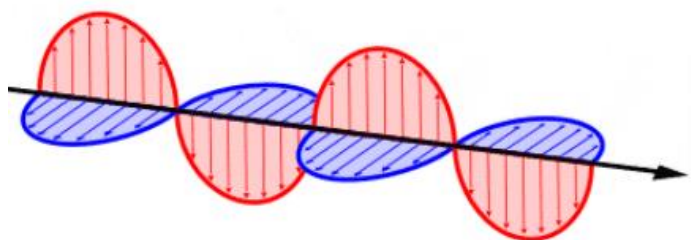


Figura 1: Representació gràfica d'una ona electromagnètica amb el camp elèctric (ona vermella) i el camp magnètic (ona blava).

#### 6.1.1. Característiques de les ones electromagnètiques

El comportament d'una ona electromagnètica ve definit per un seguit de característiques que es poden mesurar.



Una de les magnituds que es pot mesurar és l'amplitud. Simbolitzada amb la lletra A, és la distància màxima entre punt més llunyà de l'ona i la posició d'equilibri<sup>1</sup>.

El període, representat amb la lletra T, és el temps que tarda qualsevol punt d'una ona a completar un cicle. És a dir, es defineix com el temps que triga l'ona en recórrer una distància equivalent a la longitud d'ona.

La longitud d'ona, expressada amb la lletra grega  $\lambda$ , és la distància entre dos punts adjacents que es troben en el mateix moment d'oscil·lació (Fig. 2). Habitualment, s'acostuma a mesurar la distància que hi ha entre dos pics de l'ona.

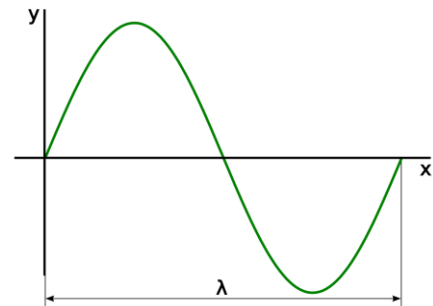


Figura 2: Representació gràfica d'una ona amb la corresponent longitud d'ona indicada.

Per altra banda, la freqüència ( $f$ ) és la mesura del nombre d'oscil·lacions que ocorren per unitat de temps. Es poden establir relacions entre les magnituds d'una ona. El període i la freqüència tenen una relació inversament proporcional; si el nombre d'oscil·lacions per unitat de temps augmenta, el període disminuirà. Dit d'una altra manera, si el temps que tarda a completar-se un cicle augmenta, la freqüència serà menor. Aquest comportament es pot representar atenent la següent fórmula matemàtica.

$$T = \frac{1}{f} = f^{-1}$$

La velocitat de propagació és un paràmetre que relaciona totes tres magnituds. És la velocitat a la que una ona es mou a través d'un medi determinat. En cada medi, el valor és diferent segons les característiques de l'espai. La velocitat de propagació d'una ona es pot calcular amb la següent expressió:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

Com s'ha dit anteriorment, la radiació electromagnètica no necessita cap medi de transmissió i, per tant, pot propagar-se en el buit. Experimentalment, s'ha comprovat

<sup>1</sup> Quan es parla de posició d'equilibri es fa referència al punt que té un valor d'amplitud igual a 0. Els punts d'equilibri es troben a l'eix d'abscisses.

que la velocitat de propagació de les ones electromagnètiques és igual a la velocitat de la llum<sup>2</sup>.

Donat que la velocitat de la llum és un valor fix, es pot concloure que la freqüència i la longitud d'ona són magnituds que presenten una proporcionalitat inversa. Per tant, al comparar dues ones amb diferent longitud d'ona, aquella que tingui una major  $\lambda$  tindrà la menor freqüència.

## 6.2. Els satèl·lits

Un sistema de navegació per satèl·lit és un conjunt de satèl·lits que cooperen mútuament per oferir serveis de geolocalització a usuaris terrestres.

Un satèl·lit és qualsevol cos que orbita al voltant d'un altre cos més massiu, com ho són la Terra, la Lluna o l'Estació Espacial Internacional. Aquest treball s'enfoca en els satèl·lits artificials<sup>3</sup>, objectes creats pels humans capaços d'exercir unes funcions específiques mentre orbiten al voltant d'un cos celeste.

Les seves funcions són molt variades. Com que es troben per sobre de l'atmosfera i no pateixen interferències per part de núvols, pols, sorra o altres molècules; poden explorar l'espai amb més facilitat que un telescopi terrestre. Sens dubte, les comunicacions a distància constitueixen una de les utilitats més importants dels satèl·lits.

Qualsevol satèl·lit ha de constar de quatre parts essencials per al seu correcte funcionament.

- Ha de tenir un sistema d'alimentació. Com qualsevol altre aparell, un satèl·lit també necessita energia per funcionar. Dins d'aquest sistema es cobreix la generació, l'emmagatzematge i la conversió de l'energia. Per exemple, un satèl·lit amb panells solars utilitza l'energia solar per alimentar la resta d'instruments i sistemes de la nau.

---

<sup>2</sup> La velocitat de la llum,  $c$ , té un valor de 299 792 458 metres per segon, tot i que habitualment s'utilitza l'aproximació de  $3 \cdot 10^8$  m/s.

<sup>3</sup> S'anomena satèl·lit artificial aquell objecte col·locat en òrbita pels humans, per distingir-ho dels satèl·lits naturals.

- Ha de tenir un sistema de control d'orientació. El satèl·lit necessita poder controlar la seva orientació per situar els panells solars de tal forma que produeixin la major quantitat d'energia, per col·locar els motors en la direcció correcta o dirigir les antenes cap a la Terra. Aquest sistema està format per sensors (giroscopis, rastrejadors d'estrelles) i actuadors (volants de reacció, motors).
- Ha de tenir un sistema de comunicació. Les estacions a la Terra que vetllen per l'estat dels satèl·lits necessiten comunicar-se amb ells per rebre dades o per enviar millores de programari.
- Ha de tenir els instruments útils per complir la seva funcionalitat. En satèl·lits de posicionament són tots els transmissors, antenes i processadors emprats en emetre senyals a la Terra.

A més, els satèl·lits dedicats a la geolocalització han d'incorporar un rellotge atòmic, un tipus de rellotge que utilitza àtoms per a la mesura del temps. Un rellotge qualsevol sap el temps perquè compta els cops que un objecte es mou cíclicament; per exemple el pèndol d'un rellotge mecànic antic.

En el cas dels rellotges atòmics, es mesura la freqüència de la vibració de l'isòtop de cesi-133<sup>4</sup> (<sup>133</sup>Cs). Aquests rellotges són molt importants per la precisió que aporten a la mesura del temps. Un error de 10 nanosegons<sup>5</sup> comporta fins a 3 metres d'error en la posició calculada. També hi ha models que utilitzen àtoms de rubidi o hidrogen.

### 6.3. Sistemes de navegació per satèl·lit

Un sistema de navegació per satèl·lit (GNSS) és una constel·lació de satèl·lits que envien dades de la seva posició amb el propòsit d'aportar els mitjans necessaris perquè un receptor pugui calcular la seva localització de manera precisa.

Actualment hi ha 4 grans sistemes GNSS: Galileo, Beidou, GLONASS i GPS.

---

<sup>4</sup> Està definit per conveni que 9.192.631.770 vibracions de <sup>133</sup>Cs corresponen a 1 segon.

<sup>5</sup> Un nanosegon és la milionèsima part d'un segon, és a dir 10<sup>-9</sup> segons.

### 6.3.1. Galileo

El sistema de posicionament promogut per la Unió Europea i l'Agència Espacial Europea és el projecte Galileo. Va començar a donar serveis inicials amb un baix rendiment el desembre de 2016 i a finals de l'any 2022 la constel·lació està pràcticament completada.

Galileo és l'únic sistema GNSS pensat per a l'ús civil com a primera opció, a diferència d'altres en què la motivació inicial va ser la vessant militar. Arran d'això es justifica la necessitat europea de tenir un sistema de navegació per satèl·lit propi: per desvincular-se i independitzar-se de sistemes d'altres països que tenen la capacitat de desconnectar els satèl·lits per limitar-los a una utilitat exclusivament militar.

El sistema Galileo està previst que tingui 30 satèl·lits en òrbita quan estigui en ple funcionament, utilitzant 24 activament i 6 en reserva. No obstant això, de moment s'han enlairat 28 aparells, 23 dels quals en correcte funcionament.

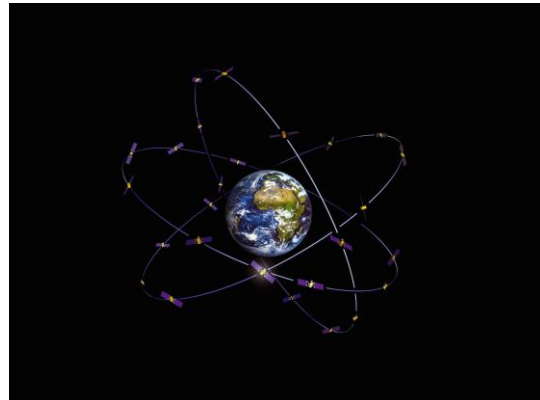


Figura 3: Constel·lació Galileo amb la visualització dels 3 plans orbitals. Font: [https://gssc.esa.int/navipedia/images/5/56/Galileo\\_Space\\_Segment.jpg](https://gssc.esa.int/navipedia/images/5/56/Galileo_Space_Segment.jpg)

La constel·lació està distribuïda en tres plans orbitals al voltant de la Terra amb una inclinació de  $56^\circ$  respecte d'equador (Fig. 3). Els satèl·lits tenen una massa aproximada de 700

kg i ocupen un volum de  $3,56 \text{ m}^3$ , tenint una esperança de vida prevista de més de 12 anys.

Els satèl·lits naveguen per òrbites del tipus MEO<sup>6</sup> a una altura de 23.222 quilòmetres respecte la superfície terrestre. Amb això s'aconsegueix que a qualsevol punt de la Terra arribi el senyal de 4 satèl·lits com a mínim. A la majoria de punts de la Terra, entre 6 i 8 satèl·lits Galileo estan a la vista, fent que sigui un sistema amb molta precisió.

---

<sup>6</sup> Una òrbita MEO (de les seves sigles angleses, *Medium Earth Orbit*) és aquella que se situa en unes altures compreses entre 2000 i 35.786 quilòmetres i el període d'una òrbita completa és menor a 24 hores.

### 6.3.2. Beidou

Beidou és el sistema de navegació per satèl·lit desenvolupat per Xina. Inicialment, Beidou va ser pensat com a sistema de navegació d'ús regional per a territoris d'Àsia i el Pacífic a mode d'experiment. Aquesta constel·lació només constava de 4 satèl·lits en òrbites geoestacionàries i proporcionava una precisió variable d'entre 20 i 100 metres, en funció del calibratge del receptor.

No obstant això, a partir de la tercera generació de satèl·lits es va proposar oferir una cobertura mundial, més enllà dels límits regionals asiàtics. D'aquesta forma, el sistema de navegació per satèl·lit global xinès està compost per tres satèl·lits en una òrbita geoestacionària, 24 en òrbites MEO i tres més en òrbites geosíncrones inclinades. Hi ha 30 satèl·lits en funcionament que, juntament amb els satèl·lits de generacions passades, componen una constel·lació formada per 42 satèl·lits. La precisió se situa al voltant dels 25 metres horitzontals i 30 metres verticals.

### 6.3.3. GLONASS

El sistema de navegació per satèl·lit desenvolupat per Rússia és el GLONASS. És el successor de *Tsiklon*, un sistema de radionavegació previ inefectiu i en desús, ja que trigava massa temps per calcular una posició. Així doncs, neix GLONASS com a substitut de *Tsiklon*, amb l'esperança de poder ser usat pels cossos militars russos. El primer satèl·lit es va enlairar el 1982 i la constel·lació total la conformen 24 aparells en òrbites MEO distribuïdes en tres plans orbitals d'una inclinació de  $64,8^\circ$  a una altura de 20.000 quilòmetres. Teòricament, la precisió era de 65 metres però un cop en marxa es va mesurar que realment aportaven una exactitud de 20 metres.

Inicialment, GLONASS s'havia destinat a funcions militars. Després d'una crisi econòmica que va comportar la fallida de la majoria de la constel·lació per falta de manteniment, es van enlairar nous satèl·lits amb millors prestacions. Aleshores, per ordre del president Vladimir Putin, es va obrir tot el sistema a l'ús civil obert. Així doncs, a partir del 2007 un senyal amb una precisió màxima de 10 metres va ser obert al públic.

GLONASS ha tingut diversos models i generacions de satèl·lits, amb els més moderns aconseguint precisions de fins a 2,8 metres.

#### 6.3.4. GPS

El sistema GPS és el sistema de navegació per satèl·lit dels Estats Units d'Amèrica. Aquest projecte va començar a desenvolupar-se el 1973 i els primers satèl·lits es van posar en òrbita el 1978. Inicialment, el GPS era exclusivament d'ús militar però es va permetre l'accés públic arran d'un accident en plena Guerra Freda, quan un avió de combat soviètic va abatre un avió de passatgers el 1983.

A més, també posseïa l'habilitat de degradar el senyal a voluntat. La intenció era evitar que els cossos militars enemics poguessin usar el GPS per a guiar míssils. Aquesta característica aportava un error de fins a 100 metres. Per aquest motiu la funció va ser desactivada l'any 2000.

La constel·lació de GPS conté 24 satèl·lits distribuïts en sis plans orbitals amb una inclinació de  $55^\circ$  respecte l'equador de la Terra. Tarden aproximadament 12 hores en fer una volta sencera, ja que es troben també en òrbites MEO a una altura de 20.200 quilòmetres. Actualment, en òrbita hi ha 31 satèl·lits en funcionament, per aportar redundància i per millorar la precisió del sistema.

Cada satèl·lit GPS emet de manera contínua en dues freqüències de la banda L, que es troba en el rang entre 1 i 2 GHz. És molt adient perquè els senyals no interactuen amb núvols, pluja o vegetació i no es veuen alterats. Per tant, les dues freqüències a les que emet GPS són:

- L1: freqüència corresponent a 1575,42 MHz.
- L2: freqüència corresponent a 1227,60 MHz.

De fet, s'emeten tres senyals: dues a través de L1 i una per L2. Només una d'elles està destinada a l'ús públic, la resta són per a utilitats militars i autoritzats del Departament de Defensa dels EUA. Cada senyal que s'envia té tres components:

- Ona portadora: és una ona sinusoidal a la freqüència que s'envia (1575,42 MHz o 1227,60 MHz).
- *Ranging Code*: és un codi binari que permet al receptor calcular el temps que ha tardat l'ona en viatjar des del satèl·lit. S'utilitzen seqüències de codis pseudoaleatoris, conjunts de zeros i uns que semblen generats aleatòriament

encara que segueixen un patró determinat que es repeteix cíclicament. A més, el *Ranging Code* s'utilitza perquè permet que tots els satèl·lits de la constel·lació emetin el senyal a la mateixa freqüència sense interferir els uns amb els altres.

Les cadenes de codi que s'utilitzen per al senyal públic s'anomenen codis C/A (de *Coarse/Acquisition*, en anglès). Aquestes seqüències són codis Gold, un tipus de codis pseudoaleatoris que tenen una correlació entre ells gairebé nul·la, de manera que no interfereixen mútuament i permeten identificar cada satèl·lit. Cada codi Gold té una llargada de 1023 xips<sup>7</sup> que es transmeten a una velocitat de  $1,023 \cdot 10^6$  xips per segon. L'ús de codis Gold és una forma de accés múltiple per divisió de codi (CDMA, per les seves sigles angleses), una tècnica de transmetre múltiples senyals a la mateixa freqüència sense interferir uns amb els altres.

- Dades de navegació: són codis binaris que transmeten informació sobre paràmetres del satèl·lit que el receptor necessita conèixer. El missatge conté l'almanac<sup>8</sup>, les efemèrides<sup>9</sup> del satèl·lit, l'estat del satèl·lit i el dia i hora precisa.

Aleshores, el *Ranging Code* i les dades de navegació es modulen a l'ona portadora. Modular és l'acció de modificar algun paràmetre d'una ona sinusoidal per transportar informació. Els tipus més comuns són la modulació de freqüència i la modulació d'amplitud, tot i que el senyal GPS es modula per desplaçament de fase. La fase és una propietat que tenen ones amb la mateixa freqüència, quan no estan alineades horitzontalment.

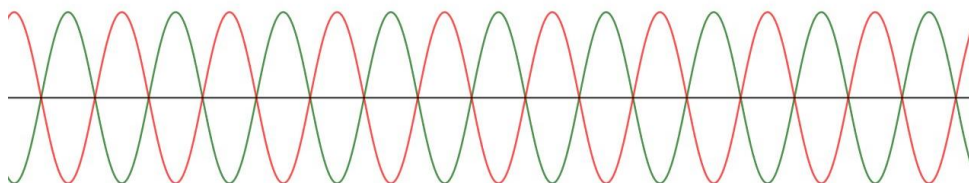


Figura 4: Dues ones sinusoidals amb la mateixa freqüència desfasades per 180 graus. Imatge pròpia generada amb l'aplicació Geogebra <https://geogebra.org>

---

<sup>7</sup> Un xip és el mateix que un bit amb la diferència que no porta informació.

<sup>8</sup> L'almanac d'una constel·lació és una aproximació de la posició de cada satèl·lit i d'altres informacions orbitals.

<sup>9</sup> Les efemèrides d'un satèl·lit són les informacions precises que s'envia sobre la seva localització i temps.

El *Ranging Code* i les dades de navegació es mesclen en un sol senyal utilitzant la lògica binària. Un operador binari és un element que usa la lògica binària per obtenir un resultat a partir de dos valors d'entrada. En aquest cas es fa servir l'operació disjunció exclusiva (XOR), que emet un valor de sortida alt quan les dues entrades siguin diferents. D'aquesta manera s'obté un únic codi, producte de la mescla del *Ranging Code* i les dades de navegació, que és el que es modula a l'ona portadora.

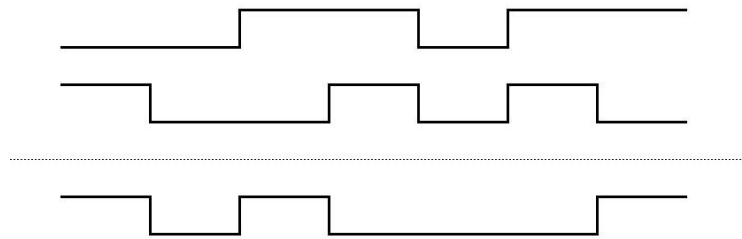


Figura 5. Exemple que mostra el procés de mesclar dos codis binaris aplicant l'operador disjunció exclusiva. Les dues primeres seqüències es combinen específicament per donar lloc al tercer codi. Imatge pròpia

El principi de funcionament de la modulació per desplaçament de fase és el següent:

- Quan el codi generat a l'operador lògic és igual a 0, l'ona portadora es manté igual, sense cap canvi a la fase.
- Quan el codi generat a l'operador lògic és igual a 1, l'ona portadora canvia la fase en 180 graus.

Com que els dos estats possibles són binaris (0 i 1), es diu que aquest tipus de modulació és binària, o BPSK<sup>10</sup>. Aquesta és l'ona que emeten els satèl·lits, que ja conté els elements necessaris per què un receptor pugui calcular-ne la posició captant els seus senyals.

---

<sup>10</sup> BPSK: *Binary Phase-Shift Keying*



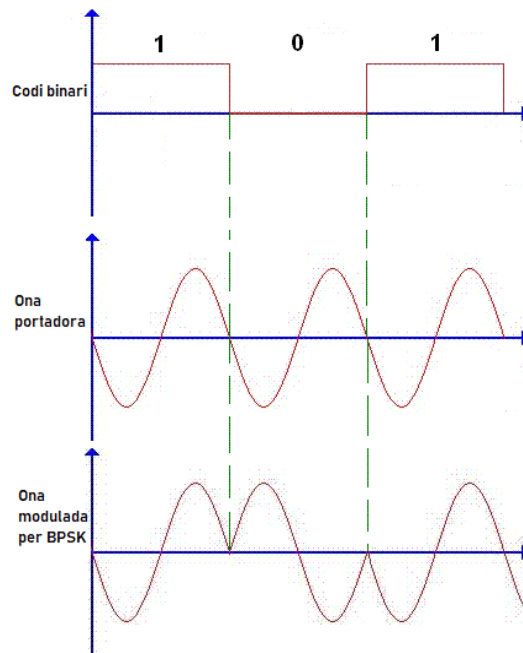


Figura 6: Esquematzació del procés de modulació per desplaçament de fase binaria. El codi binari (primera gràfica) es modula a la ona portadora (segona gràfica) per desplaçament de fase. A la tercera gràfica es veu que el canvi de valor del codi binari provoca el canvi de fase. Imatge extreta de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Modulator\\_BPSK-sygnal.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Modulator_BPSK-sygnal.gif) amb llicència de Creative Commons i posteriorment editada.

## 6.4. Determinació de la posició

Per determinar la posició d'un receptor, s'utilitzen unes tècniques per fer-ho de la manera més eficaç i precisa possible. La magnitud que es mesura és el temps que tarda el senyal a recórrer l'espai entre el satèl·lit i el receptor. Aquest temps de propagació del senyal es multiplica per la velocitat de la llum per obtenir la distància entre l'emissor i l'antena ja que:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \rightarrow \Delta x = v \cdot \Delta t$$

Si aquesta distància es mesura des de diferents satèl·lits a unes posicions conegudes, el receptor pot calcular la seva localització.

Es pot considerar un exemple en dues dimensions per facilitar-ne la comprensió. Amb un únic satèl·lit, es pot afirmar que el receptor es troba en qualsevol punt del cercle amb centre al satèl·lit amb una distància calculada amb el temps de propagació. Si simultàniament es mesura també la distància del receptor a un segon satèl·lit, les opcions es limiten a les dues interseccions de les dues circumferències. Per resoldre la incertesa només cal afegir un tercer satèl·lit a la computació.

D'aquesta manera es pot trobar la posició d'un receptor en una situació en dues dimensions utilitzant només tres satèl·lits. No obstant, en aquest exemple s'han

passat per alt els errors en el rellotge; s'ha assumit que tant els rellotges dels satèl·lits com el rellotge del receptor estan en perfecta sintonia. En realitat els rellotges atòmics són extremadament precisos però acumulen errors amb el pas del temps, i el rellotge del receptor, que és un rellotge de quars, no és tan exacte ja que té un baix cost

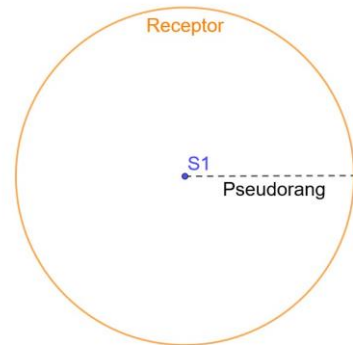


Figura 7: Representació gràfica del cas de posicionament amb 1 satèl·lit. Imatge pròpia generada amb Geogebra. <https://www.geogebra.org/classic>

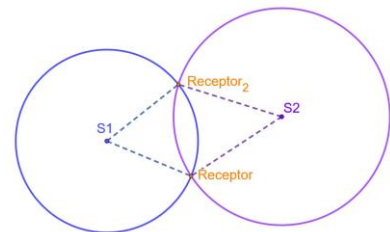


Figura 8: Representació gràfica del cas de posicionament amb 2 satèl·lits. Imatge pròpia generada amb Geogebra. <https://www.geogebra.org/classic>

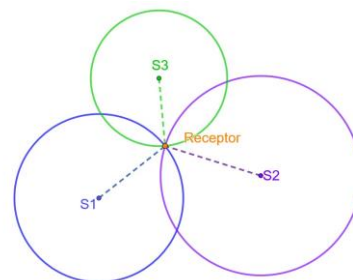


Figura 9: Representació gràfica del cas de posicionament amb 3 satèl·lits. Imatge pròpia generada amb Geogebra. <https://www.geogebra.org/classic>

econòmic. Una diferència de 100 nanosegons (0,0000001 segons) comporta un error de 30 metres. La distància que es calcula que s'anomena pseudorang, ja que no és la mesura real sinó que és una mesura aparent per culpa dels errors en el temps

Aleshores, en el moment de calcular la posició no es pot trobar un punt precís, sinó que hi ha una àrea en la que el receptor pot ser-hi.

La realitat és que no vivim en un món bidimensional, sinó que conté tres dimensions. Per tant, la determinació de la localització d'un receptor a través d'un sistema de navegació per satèl·lit és més complexa, tot i que segueix el mateix principi. A diferència del cas anterior, si es calcula el pseudorang amb un satèl·lit el receptor es pot trobar en qualsevol punt de l'esfera al voltant del satèl·lit. Quan s'afegeix un segon satèl·lit el receptor es limita al perímetre de la intersecció de les dues esferes, és a dir, als punts que són tangents a les superfícies de les dues esferes. Amb la mesura des d'un tercer satèl·lit es redueixen a dues les opcions possibles i gràcies a un quart satèl·lit s'escull un dels punts, que és la posició del receptor.

Ara bé, per calcular una distància al satèl·lit, primer s'ha de conèixer el temps de propagació del senyal. En un instant de temps determinat, el satèl·lit emet un senyal que un receptor mesura. Aquest senyal captat està desplaçat en el temps respecte el senyal emès, a causa del temps de propagació i la distància entre aparells. Per quantificar-ne el seu valor, al receptor es genera una rèplica del codi emès, que es desplaça en el temps fins aconseguir una correlació amb el senyal rebut. Aquest ajustament del senyal al receptor es mesura per obtenir el temps de propagació del senyal.

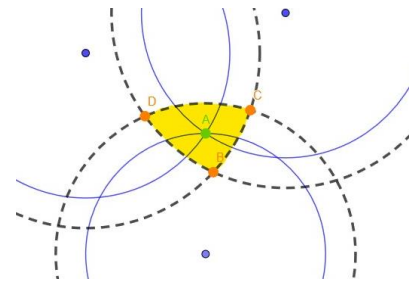


Figura 10: Representació gràfica del cas de posicionament amb 3 satèl·lits amb error de sincronització en els rellotges. Les línies contínues representen la distància real entre el satèl·lit i el receptor. En canvi, les línies discontinües són la mesura del pseudorang. Imatge pròpia generada amb Geogebra.

<https://www.geogebra.org/classic>

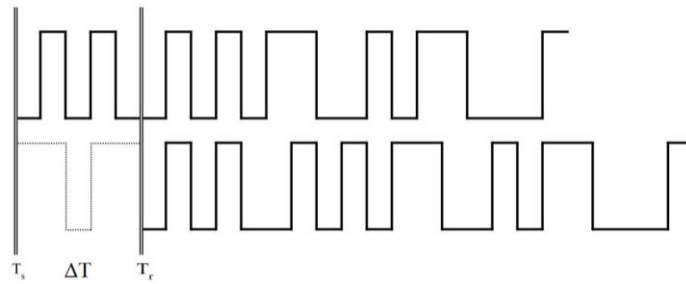


Figura 11: Visualització conceptual del senyal enviat pel satèl·lit i el senyal rebut al receptor, retardat pel temps de propagació. Imatge pròpia.

El temps de propagació correspon a  $\Delta T$ , que multiplicant-ho per la velocitat de la llum s'obté la distància real entre el satèl·lit i el receptor. En aquest cas, el càlcul seria:

$$r = c (T_r - T_s) = c \cdot \Delta T$$

on:

- $r$  = és la distància real entre satèl·lit i receptor.
- $c$  = és la velocitat de la llum.
- $T_r$  = és el temps en el que el receptor capta el senyal.
- $T_s$  = és el temps en el que el satèl·lit transmet el senyal.
- $\Delta T$  = és el temps de propagació del senyal per l'espai.

## 6.5. Errors de mesura

No obstant, la realitat no és un món tan ideal i el senyal carrega un plec d'errors causats per l'efecte de l'atmosfera terrestre, interferències externes i diferències en els rellotges. Aquests errors modifiquen i alteren el temps de propagació del senyal, resultant en una mesura del pseudorang equivocada i una posició imprecisa.

De l'atmosfera terrestre, la ionosfera és la principal culpable de les interferències amb les ones de ràdio. És una capa de la part superior de l'atmosfera que conté un nombre elevat de partícules ionitzades i electrons lliures a causa de la radiació que reben. Aquesta radiació procedeix en gran part del Sol i es poden observar les diferències de l'extensió de la capa entre el dia i la nit.

La ionosfera és un medi dispersiu, és a dir, que alenteix més o menys el senyal depenent de la seva freqüència. L'error induït depèn de varis paràmetres: l'altura del satèl·lit respecte l'horitzó, dia de l'any, activitat solar, direcció d'observació i moment

del dia. Una bona aproximació és dir que quanta més estona el senyal estigui dins l'atmosfera, més s'atenuarà i s'alentirà. No obstant, hi ha diversos models per entendre i compensar l'efecte de la ionosfera. El sistema GPS utilitza el model Klobuchar, desenvolupat per l'exèrcit dels Estats Units, que amb la següent fórmula pot estimar el retard causat per la ionosfera.

$$v = \frac{40.3}{cf^2} \cdot TEC$$

on:

- $v$  = és el retard causat per la ionosfera
- $f$  = és la freqüència del senyal
- $c$  = és la velocitat de la llum
- $TEC$  = és la quantitat d'electrons per metre quadrat (de l'anglès, *Total Electron Count*)

A l'atmosfera, la troposfera també aporta gran quantitat d'errors que és necessari que siguin compensats. Aquí, el retard és major o menor en base a l'índex de refracció del medi, la temperatura, la pressió atmosfèrica i la humitat. Si no es corregeixen aquests errors, un satèl·lit a la posició zenit<sup>11</sup> pot aportar fins a 2,4 metres d'imprecisió.

Un altre tipus d'error és el contingut en les efemèrides del satèl·lit. Periòdicament, les efemèrides dels satèl·lits es calculen i s'envien des de les sales de control, que posteriorment es transmeten als usuaris en el missatge de les dades de navegació. El causant d'aquesta imprecisió és una descripció errònia de la posició i òrbita del satèl·lit, indicant que està situat, en un temps determinat, en un punt que divergeix del

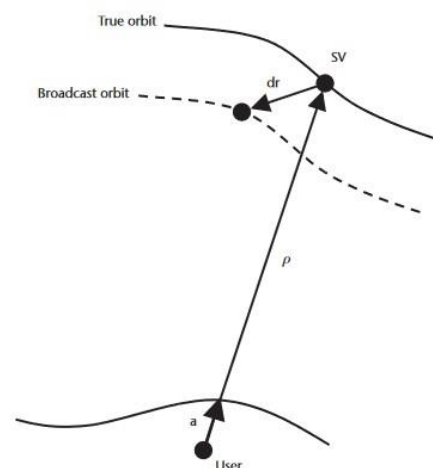


Figura 12: Visualització de l'error comprès en l'efemèrides. La línia discontinua indica l'òrbita teòrica, mentre que la línia contínua és l'òrbita real. Imatge extreta del llibre "Understanding GPS: Principles and applications" d'Elliott D. Kaplan i Christopher J. Hegarty

<sup>11</sup> La posició zenit és el punt al cel directament sobre un observador

lloc real. L'error aportat a la mesura del pseudorang per la inexactitud de les efemèrides s'aproxima als 0,8 metres.

El fenomen de la multitrajectòria és el fet que un senyal sigui detectat per un receptor per múltiples vies per culpa de què reflecteixi a superfícies pròximes, causant errors i interferències en la mesura. Té més o menys efecte segons la posició del receptor, l'elevació del satèl·lit, les característiques del senyal i l'antena i la capacitat de processament del receptor. L'error aportat pel fenomen de la multitrajectòria no sol superar els 3 metres.

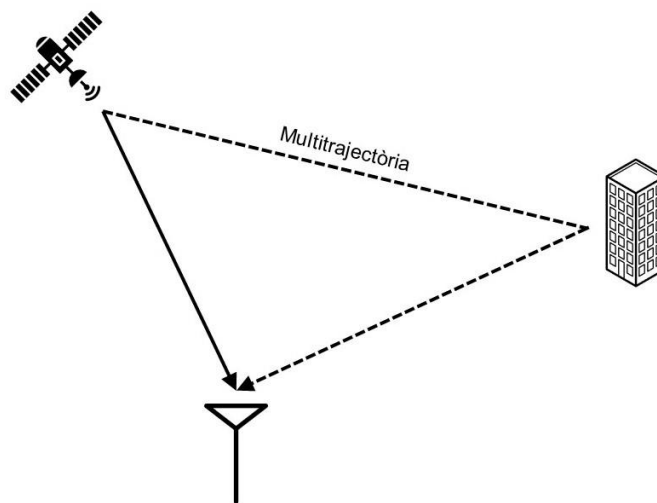


Figura 13: Representació del fenomen de la multitrajectòria. El satèl·lit emet un senyal. Aquest pot arribar a l'antena directament o pot arribar-hi sent reflectat per un edifici proper, aportant errors de mesura. Imatge pròpia.

Un factor que determina en gran part l'exactitud de la mesura és la geometria satel·lital. Quan es parla de geometria satel·lital es refereix a la posició entre els satèl·lits visibles respecte el receptor. El que s'ha d'intentar és que els senyals que rep una antena procedeixin de satèl·lits el més separats els uns dels altres com sigui possible. Per contra, si quatre satèl·lits que s'usen per al càlcul de la posició es troben molt junts, la mesura serà molt inacurada. El factor que s'utilitza per quantificar aquest error s'anomena *dilution of precision* (DOP). Un valor DOP baix denota que la geometria entre els satèl·lits emprats al càlcul de la posició és millor que la d'un valor DOP elevat.

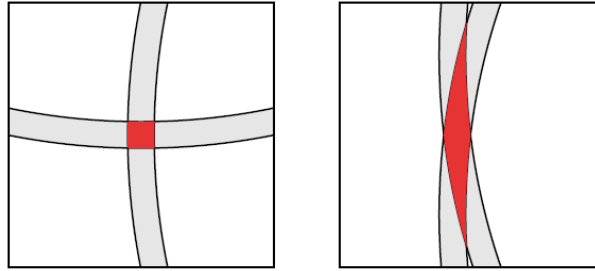


Figura 14: Representació gràfica del concepte de Geometric Dilution of Precision. La imatge de l'esquerra té un valor DOP baix, ja que els satèl·lits estan molt separats i l'àrea possible de localització del receptor és petita. La imatge de la dreta té un valor DOP elevat, la que els dos satèl·lits es troben molt junts i l'àrea que formen té més superfície i té una forma allargada. Imatges editada extreta de:  
[https://people.csail.mit.edu/bkph/ftmrrt\\_placement](https://people.csail.mit.edu/bkph/ftmrrt_placement)

Finalment, un cop mesurats els pseudorangs a cada satèl·lit visible es pot mesurar la posició resolent les anomenades equacions de posició. Les equacions de posició de la constel·lació GPS és un sistema d'equacions que són les següents:

$X$ ,  $Y$  i  $Z$  corresponen a les coordenades del receptor que s'intenten trobar.  $X_i$ ,  $Y_i$  i  $Z_i$ , on  $i$  és el nombre de satèl·lits amb els que es calcula la posició, corresponen a les coordenades de cada un dels satèl·lits.  $c$  és el valor de la velocitat de la llum.  $t_b$  és el desfasament del rellotge del receptor. Per últim,  $d_i$  és el pseudorang entre satèl·lit i receptor.

Aïllant les coordenades del receptor s'obté, per fi, la posició numèrica del receptor. Recordar que cada cop que es diu calcular la posició, es refereix a resoldre aquestes equacions per obtenir la ubicació del receptor.

$$\begin{aligned}\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}+ct_B &= d_1 \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}+ct_B &= d_2 \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2}+ct_B &= d_3 \\ \sqrt{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2+(z-z_4)^2}+ct_B &= d_4\end{aligned}$$

Figura 15: Les equacions de posició del sistema GPS. Imatge extreta de:  
<https://www.math.tamu.edu/~dallen/physics/gps/gps.htm>

## 7. Ràdios definides per *software*

### 7.1. Les ràdios

Les ones electromagnètiques que envien els satèl·lits des de l'espai s'han de poder rebre i utilitzar d'alguna manera. Aquesta és la funció dels receptors de ràdio: captar els senyals i transformar-los en un corrent altern que es pugui interpretar.

L'antena és l'element que necessita qualsevol receptor per interactuar amb el camp electromagnètic, ja que s'encarrega de rebre les ones de ràdio i les transforma en un senyal de corrent altern<sup>12</sup>. Estan formades per materials metàl·lics ja que són bons conductors d'electricitat. D'aquesta manera els electrons poden oscil·lar amb més facilitat quan són estimulats per l'efecte del camp electromagnètic. El corrent altern produït té la mateixa freqüència que l'ona electromagnètica, perquè els electrons es mouen en tàndem amb l'ona.

D'antenes també n'hi ha de diferents tipus i classificacions. Per exemple, es poden distingir antenes passives d'antenes actives. Una antena activa, a diferència d'una antena passiva, té incorporat un amplificador de senyal. D'aquesta manera permet que el cable que la uneix amb el següent element del receptor sigui més llarg.

En la majoria de casos, s'utilitza un transistor com a element amplificador. Un transistor és un component electrònic semiconductor amb tres terminals, clau en la fabricació de microxips i en tota la indústria de la microelectrònica. Els transistors tenen múltiples utilitats:

- Poden fer de commutadors, amb una freqüència de canvi d'estat molt elevada.
- Poden formar portes lògiques si es combinen i connecten els uns amb els altres.
- Poden ser utilitzats com a amplificadors de senyal.

De transistors n'hi ha de dos tipus principals. Per una banda, hi ha els transistors bipolars, un tipus de transistor que utilitza materials semiconductors que tenen un excés d'electrons i materials semiconductors amb absència d'electrons amb la missió de portar una càrrega elèctrica. D'altra banda, hi ha els transistors unipolars (o FET,

---

<sup>12</sup> Un corrent altern és un tipus de corrent elèctrica en el que la direcció de moviment dels electrons canvia de sentit de forma regular i cíclica.



de *Field Electric Transistor*). Aquests fan ús del camp elèctric per controlar el pas del corrent elèctric a través del semiconductor.

A continuació, el corrent altern produït per l'antena passa per un filtratge. Quan es parla de filtratge de freqüències, un es refereix al fet de permetre en el circuit uns certs senyals a una freqüència determinada, mentre que s'eliminen aquelles situades fora del rang desitjat. Es deu a què, per l'aire, milers d'ones electromagnètiques viatgen alhora i les reben les antenes. Filtrant-les s'aconsegueix limitar els recursos a les freqüències rellevants per a cada sistema.

Per dur a terme la separació es fa servir un filtre passabanda. Un filtre passabanda és un dispositiu que permet fer precisament l'explicat en l'anterior paràgraf: acceptar un seguit de freqüències dins d'un rang determinat mentre que atenua aquelles fora del marge.

Els circuits RLC són els que habitualment s'utilitzen com a filtres passabanda. Aquest tipus de circuits estan formats per:

- Un resistor
- Una bobina
- Un condensador

Un resistor és un component electrònic que indueix el fenomen de la resistència elèctrica, amb l'habilitat de limitar el corrent i modificar la tensió d'un circuit elèctric. També, a causa de l'efecte Joule<sup>13</sup>, generen calor amb el pas d'electrons a través seu. És per això que s'utilitzen els resistors en aparells que necessiten proporcionar energia calorífica, com pot ser-ho un forn o una planxa.

Per altra banda, una bobina és un element electrònic que té la capacitat d'emmagatzemar energia elèctrica en forma de camp magnètic gràcies al fenomen de la autoinducció. Està feta d'un material conductor lligat en forma d'espiral al voltant

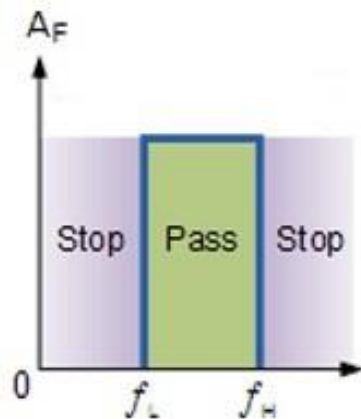


Figura 16: Efecte d'un filtre passabanda ideal sobre l'espectre de freqüència. Només s'accepten les freqüències incloses en la zona de color verd.

Imatge editada extreta de <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-a-frequency-filter/>

<sup>13</sup> L'efecte Joule és el fenomen que ocorre quan un corrent elèctric circula per un conductor, alliberant calor a causa dels xocs dels electrons i el fregament amb el material conductor.

d'un nucli. L'efecte d'una bobina depèn de quatre factors: la quantitat de voltes al nucli, el tipus de material del nucli i l'àrea i la llargada de la bobina. La unitat de mesura de la inductància elèctrica d'una bobina en unitats del Sistema Internacional és el henry [H].

Per últim, un condensador és un dispositiu electrònic que té l'habilitat d'emmagatzemar energia en forma de camp elèctric. Una comparació per entendre el seu funcionament és amb una bateria. En una bateria, des d'un dels terminals s'emeten electrons produïts a través de reaccions químiques. L'altre terminal absorbeix els electrons. Un condensador és com una bateria amb la diferència que no genera electrons, sinó que només els emmagatzema. L'habilitat d'acumular energia d'un condensador, o capacítància, es mesura en farads [F].

Un filtre passabanda es pot formar col·locant un conjunt bobina-condensador en sèrie amb un resistor, o bé connectant el conjunt bobina-condensador en paral·lel amb el resistor. En qualsevol cas, la freqüència central és determinada per la següent fórmula:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\omega_c = 2\pi f_0$$

on:

- $L$  = és la inductància de la bobina.
- $C$  = és la capacítància del condensador.
- $\omega_c$  = és la freqüència central, mesurada en radians per segon.
- $f_0$  = és la freqüència central, mesurada en hertz.

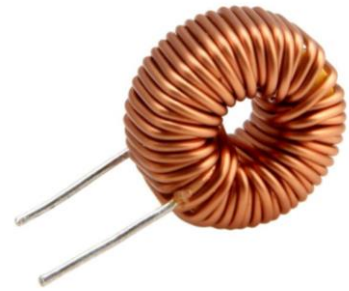


Figura 17: Bobina. Imatge extreta de <https://www.microjpm.com/products/a100uh-toroid-core-inductor-6a-coil/>



Figura 18: Condensador. Imatge extreta de <https://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=&idTienda=93&codProducto=211051007&cPath=967>

A més, l'ample de banda en el circuit amb la distribució en sèrie respon a la següent expressió matemàtica:

$$\Delta\omega = \frac{R_L}{L}$$

on:

- $\Delta\omega$  = és l'ample de banda, expressat en radians per segon.
- $R_L$  = és el valor de la resistència.

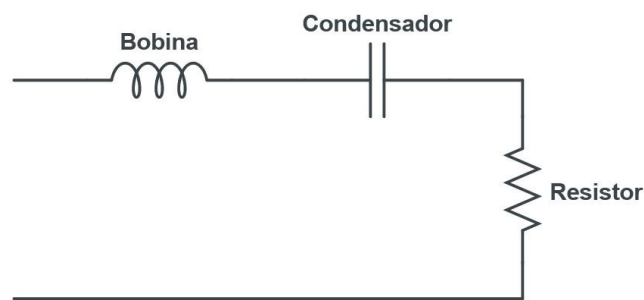


Figura 19: Esquema d'un circuit RLC amb els seus elements representats i anomenats. Imatge produïda amb l'aplicació CircuitLab a través de la seva pàgina web. <https://www.circuitlab.com>

Un cop s'obté el senyal filtrat amb la freqüència que interessa, aquest passa per un procés de desmodulació. La desmodulació és el procediment de recuperació de la informació transportada per l'ona portadora. Per a cada tipus de modulació es necessita una desmodulació diferent: una ona modulada per freqüència (FM) s'ha de desmodular amb un aparell corresponent que no serà el mateix utilitzat en desmodular una ona modulada per amplitud (AM).

Un desmodulador per a una ona modulada per desplaçament de fase es duu a terme en dues parts. Un primer bloc anomenat multiplicador precedit d'un segon bloc integrador.

En el primer procés, es multiplica el senyal rebut per un senyal de mostra a la mateixa freqüència que l'ona portadora. El que es busca amb això és trobar en quins punts del senyal rebut hi ha un canvi de fase, en quins punts hi ha gravats un bit.

- Si l'ona rebuda coincideix amb el senyal de mostra, es considera un diferencial de fase de  $0^\circ$ . El cosinus de  $0^\circ$  correspon a un valor de 1.

- Si l'ona rebuda difereix amb el senyal de mostra per  $180^\circ$  de desplaçament, es considera que té un diferencial de fase de  $180^\circ$ . El cosinus de  $180^\circ$  correspon a un valor de -1.

Amb els cosinus dels diferencials de fase entre els dos senyals, es transforma d'una mesura angular a un valor enter. Com que les dues fases difereixen de  $180^\circ$ , el cosinus és la funció perfecta per obtenir dos valors oposats (1 i -1). Amb aquests dos factors es divideix l'ona en una part amb un voltatge positiu i en una altra part amb un voltatge negatiu, tal i com es veu a la figura 20.

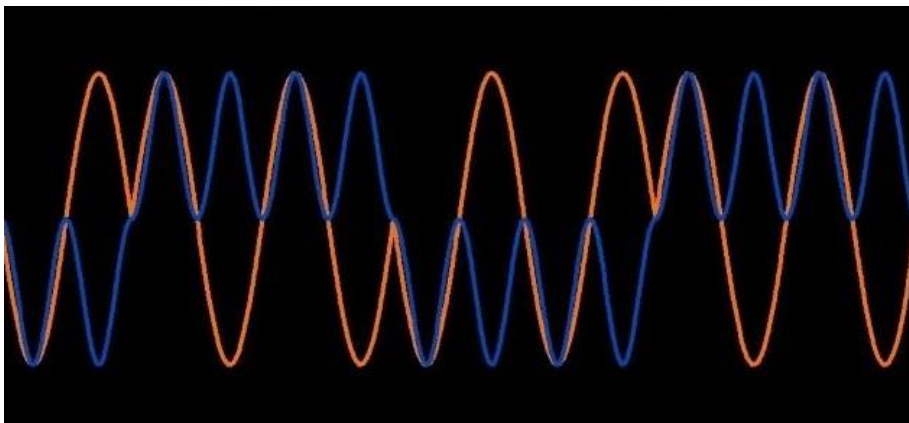


Figura 20: Representació gràfica del procés de multiplicació de la desmodulació d'una ona modulada amb desplaçament de fase. La línia taronja representa el senyal rebut a l'antena del receptor, encara modulada. La línia de color blau mostra l'efecte de la multiplicació: les seccions altes corresponen a un bit 1, mentre que les seccions baixes indiquen un bit amb valor 0. Imatge editada extreta de:  
[https://www.allaboutcircuits.com/uploads/articles/RFT\\_ch5\\_pg3\\_BPSKdemo.JPG](https://www.allaboutcircuits.com/uploads/articles/RFT_ch5_pg3_BPSKdemo.JPG)

En el següent bloc, a l'integrador, aquest senyal doble es transforma en una seqüència binària que correspon a la informació original transportada per l'ona.

Un cop el senyal ha passat per tots aquests processos (amplificació, filtratge i desmodulació), ja està a punt per ser utilitzat en un aparell corresponent. Si es tracta d'una ona sonora es connectarà a l'extrem un altaveu com a sortida, per exemple.

## 7.2. Les ràdios definides per *software*

Sabent les nocions bàsiques d'una ràdio tradicional, es pot indagar en el concepte de la ràdio definida per *software*, o SDR en les seves sigles angleses (*Software Defined Radio*). Una ràdio definida per *software* és un sistema de comunicació per ones electromagnètiques en què molts dels elements que tradicionalment havien estat implementats de manera física i analògica, se substitueixen per línies de codi reconfigurables (*software*).

Aquest canvi aporta un nou rang de funcionalitats al concepte de ràdio. En un receptor tradicional s'han de manipular i modificar peces per fer alguna mena de canvi en el funcionament. En un receptor SDR, aquestes modificacions es poden realitzar mitjançant canvis en el programari. D'aquesta manera, a diferència de la ràdio analògica, les ràdios definides per *software* poden ser prototipades, produïdes i alterades de forma més ràpida i eficient.

També, ofereixen un interval major de freqüències seleccionables i són uns dispositius econòmics de manufacturar gràcies als avenços en la indústria de l'electrònica i components digitals.

Una ràdio definida per *software*, tot i els avantatges que proporciona el programari, encara necessita d'algunes parts materials. L'antena és un element indispensable per a la recepció d'ones electromagnètiques i transformar-les en un senyal elèctric. Directament a continuació, s'hi troba un amplificador de baix soroll. Aquest és un amplificador electrònic que augmenta un senyal amb una potència molt petita mantenint la relació senyal-soroll<sup>14</sup>. Com s'ha comentat anteriorment, l'amplificació és un pas amb una alta rellevància dins del sistema. El voltatge produït a l'antena és feble i, amb la circulació a través dels elements conductors, es debilita encara més. Per això, el senyal s'amplifica abans de ser processat.

Els receptors de ràdio que utilitzen un oscil·lador per sintonitzar una freqüència intermèdia s'anomenen receptors superheterodins. La majoria de ràdios modernes

---

<sup>14</sup> La relació senyal-soroll, habitualment referida com a SNR per les seves sigles angleses (*Signal to Noise Ratio*), és un valor que compara la potència d'un senyal respecte el soroll de fons.

són d'aquest tipus. Només s'exceptuen els receptors SDR que fan ús del mostreig directe.

El senyal amplificat es dirigeix cap al mesclador de freqüències. Un mesclador de freqüències és un circuit elèctric que, quan se li apliquen dues freqüències, té la capacitat de generar un senyal de sortida amb una freqüència determinada. Un dels senyals d'entrada prové d'un oscil·lador local.

Un oscil·lador és un element electrònic que produeix un senyal periòdic, oscil·lant i a una freqüència controlada. Habitualment, en un receptor superheterodí, es tracta d'un oscil·lador de freqüència variable, que es pot modificar entre uns límits.

El senyal rebut per l'antena es mescla amb el senyal provinent de l'oscil·lador per donar lloc a un senyal a una freqüència intermèdia. Aquest procés anomenat heterodinació (heus aquí el nom receptor superheterodí) permet un millor funcionament dels circuits de processament, ja que a altes freqüències tenen un rendiment pobre. Usar un mesclador de freqüències permet captar un ventall major de freqüències i fer servir els mateixos filtres i amplificadors, configurats per processar el senyal a la freqüència intermèdia.

Tots els elements anomenats fins a aquest punt, des de l'antena fins al mesclador, formen part del que s'anomena *front-end* de freqüència de ràdio. Tenen en comú que treballen en sintonia per convertir l'ona electromagnètica a una freqüència en un senyal de corrent altern a una altra freqüència en la que sigui més senzill continuar el processament.

En un receptor superheterodí, seguit dels elements de *front-end* s'hi troba de nou un amplificador i un filtre, optimitzats a la freqüència intermèdia del receptor, per eliminar els senyals no desitjats i rebre únicament un senyal. Finalment, com una ràdio

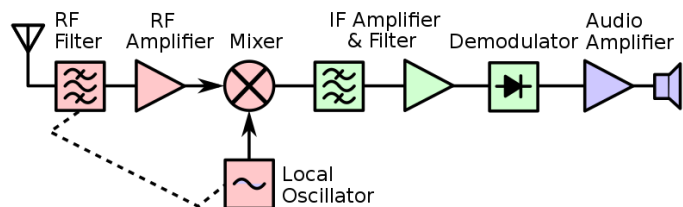


Figura 21: Diagrama de blocs d'un receptor superheterodí. Els elements ressaltats en vermell corresponen al frontend. Els elements de color verd són els que treballen amb la freqüència intermèdia. Els elements de color blavós indiquen que tracten de la sortida. Imatge extreta de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Superheterodyne\\_receiver\\_block\\_diagram\\_2.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Superheterodyne_receiver_block_diagram_2.svg)

tradicional, es duu a terme un procés de desmodulació per extreure la informació que porta l'ona.

No obstant, una ràdio definida per *software* necessita només els elements del *front-end*. La resta de components se substitueixen per programari informàtic. Per poder analitzar el senyal en un ordinador és necessari disposar d'un convertidor ADC (*analog to digital converter*).

Un convertidor analògic-digital és un dispositiu que s'utilitza per transformar un senyal analògic en un de digital, de forma que un ordinador o microprocessador ho pugui interpretar. El procés de transformació d'un senyal analògic en un de binari es pot distribuir en quatre blocs ben diferenciats per les seves funcions:

1. Mostreig
2. Retenció
3. Quantificació
4. Codificació

En el bloc de mostreig, es pren una mesura del valor real del senyal analògic. L'eficàcia del convertidor depèn de la freqüència de mostreig. Com que una ona analògica és continua, cada cop que un s'espera per mesurar el seu valor, es perd informació ja que aquesta va variant.

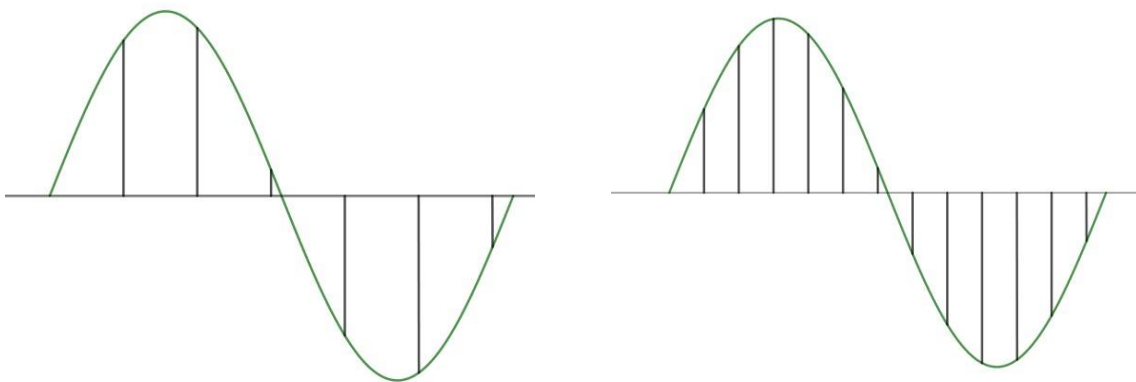


Figura 22: La imatge de l'esquerra mostra una ona sinusoidal analògica amb una freqüència de mostreig d'1 Hz (1 mesura per segon). En la imatge de la dreta s'hi representa la mateixa ona sinusoidal amb una freqüència de mostreig del doble, de 2 Hz. Imatges pròpies generades amb Geogebra.  
[www.geogebra.org/classic](http://www.geogebra.org/classic)

Per això és tan important cada quan es fa el mostreig del senyal. Tal i com es pot veure a la figura 22, mesurant més sovint el valor del senyal s'obté més informació sobre l'ona i es podrà fer una conversió més fidedigna a l'original i evitar pèrdues de dades rellevants.

El pròxim bloc de retenció s'encarrega de guardar el valor de mostreig fins que la següent mostra sigui mesurada i permetre al procés de quantificació tenir temps per avaluar la mostra.

El procés de quantificació és el pas d'un senyal continu, analògic, en un senyal discret. Un senyal continu és aquell que té un valor determinat per cada instant de temps. Per contra, un senyal discret és aquell que els seus valors es troben espaiats en el temps uniformement i només hi ha valors en aquells punts determinats.

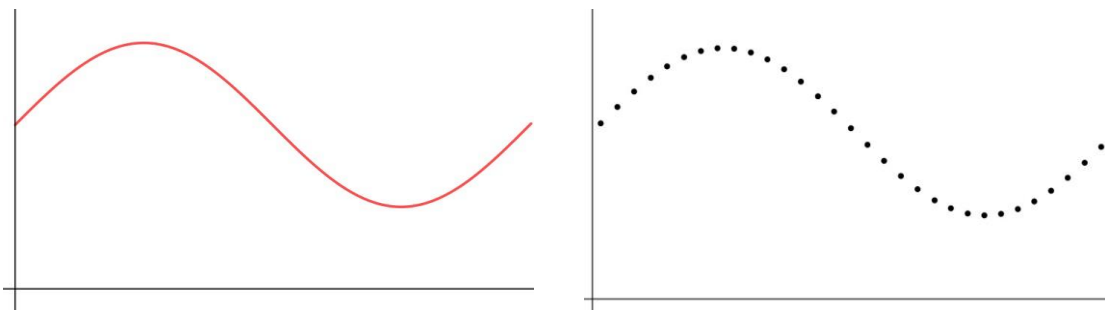


Figura 23: La imatge de l'esquerra mostra el gràfic d'un senyal continu. La imatge de la dreta mostra el mateix gràfic en format discret. Imatges pròpies generades amb el programa Geogebra <https://www.geogebra.org/classic>

Aquests senyals discrets es distribueixen en diversos nivells segons el seu valor (Fig. 24). Aleshores, per ordre temporal, es genera la seqüència de valors composta per aquests nivells de quantificació.

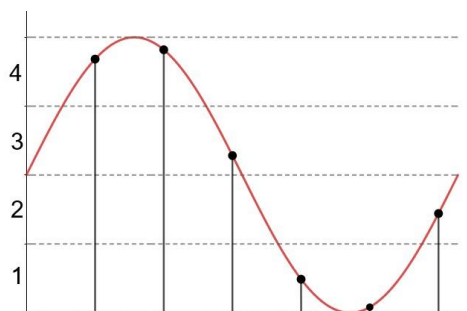


Figura 24. Visualització conceptual de la quantificació. La línia de color vermell representa un senyal analògic continu. Els punts de color negre representen la mateixa ona un cop s'ha fet la conversió a valors discrets. Es diu que cada punt es troba dins d'un nivell de quantificació, indicat a la divisió de l'eix d'ordenades. Imatge pròpia generada amb el programa Geogebra. <https://www.geogebra.org/classic>



Finalment, el bloc final correspon a la codificació, el procés on es transforma la seqüència generada al bloc de quantificació en un codi binari. A cada nivell de quantificació se li adjudica una combinació binària.

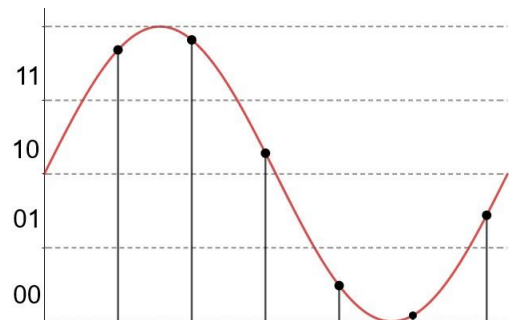


Figura 25. Visualització conceptual de la codificació. L'exemple és el mateix que el descrit a la figura X. A cada nivell de quantificació se li adjudica una combinació binària. Imatge pròpia generada amb el programa Geogebra.  
<https://www.geogebra.org/classic>

Seguint l'exemple representat a les figures 24 i 25, el senyal analògic correspondria a un senyal digital de valor: 11 11 10 00 00 01.

Un cop s'ha transformat el senyal analògic en un de digital, el senyal resultant s'envia a l'ordinador per continuar amb el procés de desmodulació, per extreure la informació transportada per l'ona. Breument, el *software* i l'ordinador duen a terme les tasques que feien els elements posteriors al *front-end*.

A través del port USB de l'ordinador, per exemple, hi entren les seqüències de dades digitals que es manipulen d'acord amb la funció final de l'aparell. L'ús de *software* permet un ventall molt ampli per utilitzar les dades capturades, que inclou la visualització de la forma d'un senyal, la localització de la posició del receptor i el desxiframent de missatges enviats per avions, d'entre altres. Per aconseguir aquestes finalitats, el *software* calcula el temps de propagació de les ones per viatjar la distància entre emissor i receptor, computen i resolen equacions matemàtiques complexes o usa algoritmes per descriptar missatges de text.

A més, aquest programari també ha de ser capaç de plasmar els resultats en una interfície gràfica amb la que els humans puguem interactuar i interpretar. La interacció humana amb les dades és el pas que completa el processament del senyal.

### 7.2.1. Bias T

Molts receptors contenen un element anomenat Bias T (o *Bias tee*) i es pot considerar un dels components d'un SDR més importants. Un Bias T és un diplexor amb tres connectors que pot aportar un corrent continu a circuits de radiofreqüència per tal d'alimentar-los, sense afectar-ne el senyal que hi passa a través.

Així doncs, l'element Bias T és qui s'encarrega d'alimentar l'amplificador de l'antena activa. Un Bias T està compost per una bobina i un condensador connectats de manera que sembla el símbol de la lletra T (Fig. 26).

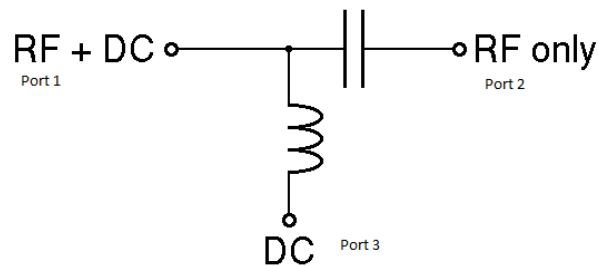


Figura 26. Esquema del circuit intern d'un Bias T. Es visualitzen els tres ports (els tres extrems), el condensador (les dues barres paral·leles) i la bobina (l'element en forma d'esprial). Imatge extreta de:  
<https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-bias-tee>

## 8. Part pràctica

La part pràctica d'aquest treball s'ha dut a terme per corroborar o rebutjar la hipòtesi formulada: l'aplicació del sistema format pel dispositiu SDR i l'antena GPS és útil i efectiva i d'un ús més recomanable que els telèfons mòbils. És per això que s'han elaborat un seguit de proves de creixent dificultat per observar les utilitats dels aparells, conèixer de primera mà les seves habilitats i per poder arribar una conclusió ferma sobre el projecte.

Per dur a terme els tests s'han utilitzat una sèrie d'elements:

- Un dispositiu RTL-SDR, model RTL2832U.
- Una antena activa GPS a la freqüència 1575,42 MHz.
- Una antena dipol telescòpica extensible amb una longitud variable de 23 a 100 centímetres.
- Un ordinador ASUS K540U
- Un telèfon mòbil Xiaomi Redmi 8

### 8.1. Prova 1: Sintonització d'una emissora de ràdio

La primera prova va consistir en sintonitzar una emissora de ràdio. Aquest cop es va utilitzar el dispositiu SDR, l'antena dipol i l'ordinador. Els objectius eren dos: comprovar que l'aparell funcionava i poder visualitzar algun concepte teòric vist anteriorment, principalment sobre la modulació i la forma dels senyals.

Abans però, com que era el primer cop que s'utilitzava el dispositiu SDR, es van haver d'instal·lar els *drivers*. Un *driver* no és més que un programa informàtic que permet al sistema operatiu de l'ordinador interactuar amb un element perifèric. Fent ús de l'aplicació *Zadig* es van poder descarregar els *drivers* genèrics per a l'artefacte connectat al port USB

A la figura 27 es mostra la interfície gràfica del programa. El seu ús és molt senzill: a la pestanya desplegable se selecciona a quin dispositiu instal·lar el *driver*, se selecciona el tipus de *driver* i finalment es prem el botó per confirmar.

Per realitzar la pràctica, es va fer ús del programa SDRSharp, que permet visualitzar la forma del senyal que arriba al receptor. Com que el dispositiu SDR ja està

configurat, només cal seleccionar-lo al desplegable i posar en marxa l'aplicació. Es tria de quina freqüència s'agafen mostres i s'endolla una antena adient. Amb la voluntat de sintonitzar una freqüència d'una emissora de ràdio, s'usa una antena dipol.

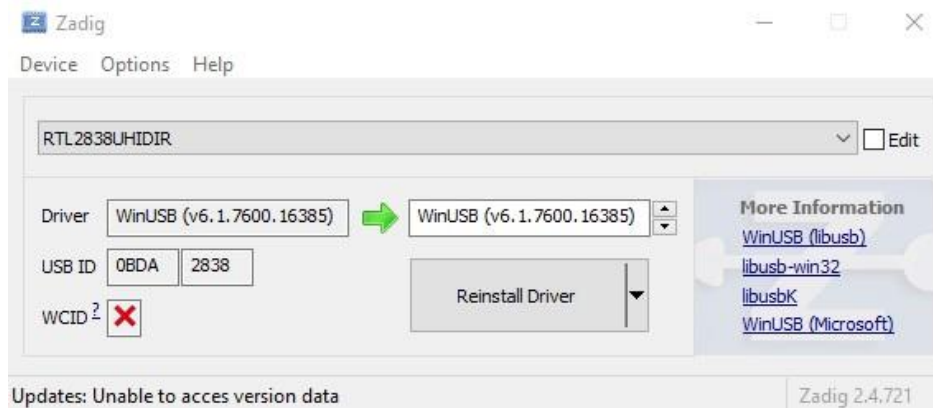


Figura 27: Interfície gràfica del programa Zadig. Imatge pròpia.

La pantalla d'SDRSharp es pot dividir en tres parts ben diferenciades:

- Una barra de menú, amb configuracions bàsiques. Aquí es poden modificar paràmetres de visualització d'eines, la recepció de mostres, canviar la freqüència de la que s'agafa el senyal i posada en marxa del programa.
- Una secció amb la configuració necessària pel processament del senyal i el seu corresponent filtratge. Primerament, hi ha vuit tipus diferents de desmodulació per a la freqüència seleccionada. Segons la modulació que aplica a l'ona al enviar-la, es tria la desmodulació corresponent per poder extreure la informació. També permet seleccionar l'ample de banda que s'escolta, quant abrupte és l'efecte del filtre i aplicar modificacions per corregir el senyal.

A la pestanya inferior se selecciona el dispositiu del que el programa rep les dades.

- Una part amb la visualització gràfica del senyal. Es mostren dos gràfics diferents. El superior ensenya l'espectre radioelèctric amb els pics corresponents als senyal que el receptor rep per cada freqüència. La intensitat es mesura en dBFS<sup>15</sup>. Per altra banda, el gràfic inferior és de tipus cascada

<sup>15</sup> dBFS o *decibels full scale* en anglès és una unitat que indica el nivell d'amplitud d'un senyal respecte el seu màxim possible.

(espectrograma). Es pot considerar un gràfic tridimensional, ja que es representa la intensitat de cada freqüència amb una escala de colors al llarg del temps. Per últim, a la dreta hi ha els controls per ajustar la visualització. Es pot modificar el zoom, el contrast de colors al gràfic de cascada, l'alçada del nivell llindar del soroll i *offset*.

Sabent això i tenint connectat el dispositiu SDR, només cal posar en marxa el programa. La freqüència seleccionada per aquesta prova correspon a 102,4 MHz i mostra un senyal clar i nítid, podent-ne visualitzar l'ona portadora i les bandes laterals causades per la modulació de freqüència.

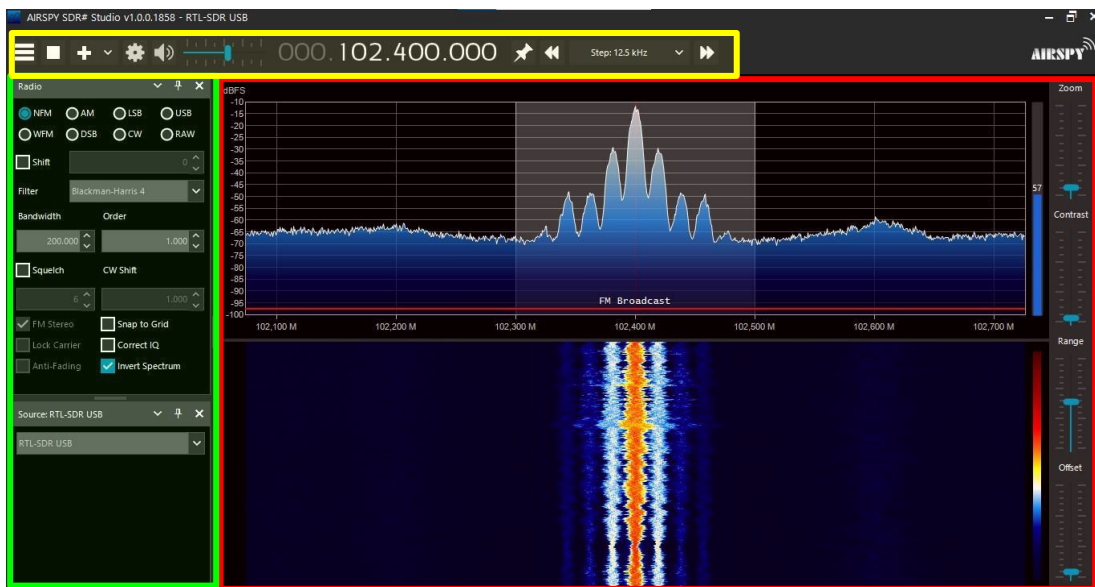


Figura 28: Interfície gràfica del programa SDRSharp amb les seccions indicades. La secció de color groc correspon a les configuracions bàsiques, la secció de color verd correspon a la configuració pel processament de la senyal i la secció de color vermell correspon a la visualització gràfica. També s'observa l'ona capturada a la freqüència 102,4 MHz. Imatge pròpia editada.

Amb aquesta primera pràctica s'ha pogut entrar en contacte per primer cop amb l'aparell SDR i conèixer una de les seves possibles aplicacions: sintonitzar una emissora de ràdio i escoltar-ne la seva senyal. A més, s'ha comprovat el correcte funcionament del dispositiu SDR. Gràcies al programa SDRSharp, s'han visualitzat conceptes teòrics d'una ona que poden semblar força abstractes a priori, com ara l'ample de banda, la freqüència i la seva intensitat i diversos formats de modulació del senyal.

## 8.2. Prova 2: Determinació de la posició

Ara sí, el següent pas va consistir en utilitzar el dispositiu SDR i l'antena GPS per determinar la posició gràcies a aquest sistema de navegació per satèl·lit. En aquesta ocasió es va fer ús de dos programes diferents. GNSS-SDRLIB i RTKLIB.

GNSS-SDRLIB és un programari de codi obert escrit en el llenguatge de programació C i C++ que permet el processament de senyals GNSS. Proporciona l'adquisició i el seguiment del senyal, càlcul de pseudorang i descriptament de les dades de navegació per a diferents constel·lacions de satèl·lits dedicats al posicionament, com ara GPS, GLONASS, Beidou o Galileo. Totes les dades d'observació les pot transmetre utilitzant formats específics per a un tractament posterior.

Per altra banda, el programa RTKLIB s'utilitza per al càlcul de la posició, aprofitant les dades rebudes de l'anterior aplicació. També és un programari de codi obert i, a part de la localització, és capaç de marcar en un mapa la ubicació o, inclús, extreure informació de serveis públics sobre les òrbites i hora dels satèl·lits.

Per a aquesta segona prova es va fer ús del dispositiu SDR i de l'antena activa GPS, connectats al port USB de l'ordinador tal i com es veu a la figura 29



Figura 29: Connexió entre l'antena GPS i el dispositiu SDR amb el port USB de l'ordinador. Imatge pròpia.

Abans de res, s'ha d'activar el bias-T per alimentar l'antena. Es duu a terme utilitzant uns fitxers de la mateixa companyia fabricant del dispositiu SDR disponibles al seu repositori en línia a GitHub<sup>16</sup>. Es descarrega una carpeta comprimida que conté dos executables: un per activar el bias-T i l'altre per desactivar-lo. És molt important aquesta acció perquè si no és impossible captar cap senyal GPS amb una antena activa.

<sup>16</sup> <https://github.com/rtlsdrblog/rtl-sdr/releases/tag/v1.1>

Primer de tot, s'inicialitza el programa GNSS-SDRLIB. Se selecciona la font de dades i la destinació de les mesures computades. En el nostre cas es tria RTL-SDR com a entrada de dades i RTCM MSM com a sortida, amb una freqüència d'enviament de 10 cops per segon. RTCM és un protocol de comunicació per enviar missatges entre programes i que puguin ser interpretats. Aquesta sortida envia les dades d'observació al programa RTKLIB, i ho fa a través del port 9999. Al següent bloc no fa falta seleccionar cap paràmetre essencial. La freqüència central, pel tipus de receptor que s'utilitza i l'estructura del sistema, només pot ser la seleccionada (1575,420 MHz). Els dos valors de la freqüència de mostreig i de la freqüència intermèdia no fa falta modificar-los.

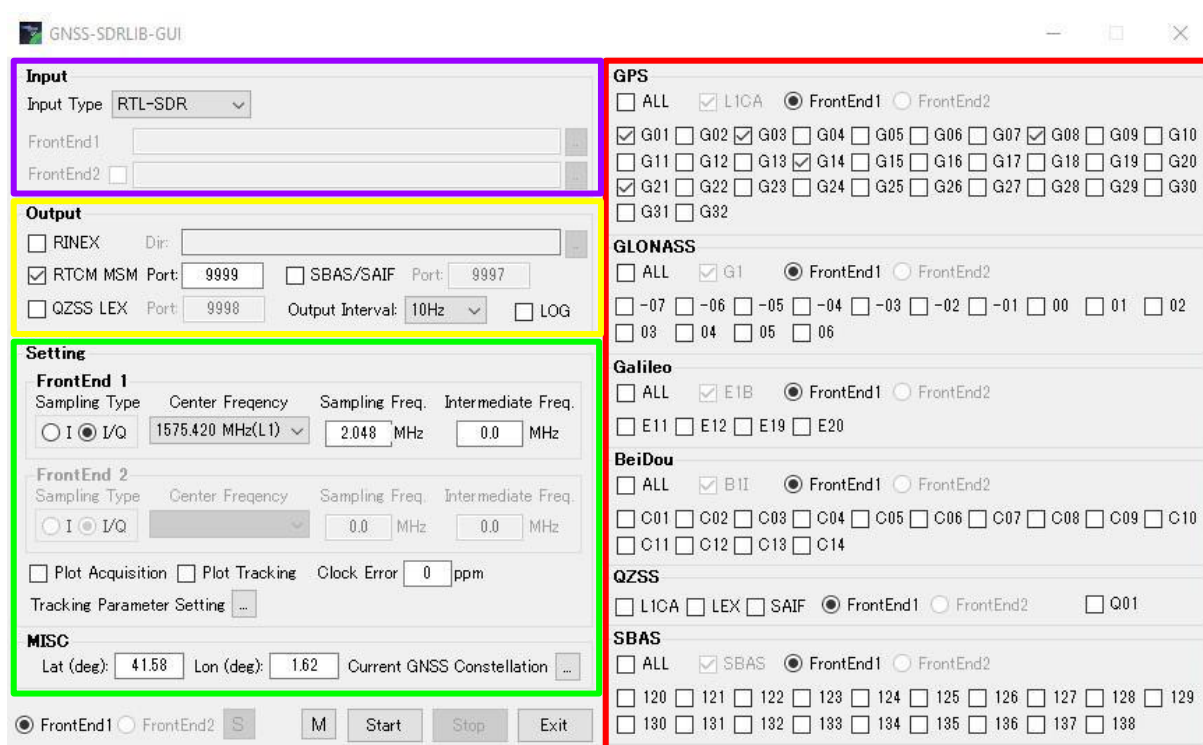


Figura 30: Interfície gràfica del programa GNSS-SDRLIB. La zona marcada de color vermell denota la graella per seleccionar els satèl·lits que es vol connectar. La zona marcada de color violeta serveix per seleccionar l'entrada de dades. La zona de color groc és per triar la destinació de les dades capturades. La zona de color verd s'utilitza per configurar la freqüència i poder visualitzar els satèl·lits visibles al cel en el moment. Imatge pròpia editada.

Les dues caselles seleccionables, quan estan activades, mostren en un gràfic la potència del senyal que l'antena està capturant, discriminada per satèl·lits. A la secció de miscel·lània, s'introdueixen les coordenades aproximades per conèixer els satèl·lits visibles en el cel i poder seleccionar-los a la meitat dreta de la interfície. Realment es

poden triar tots els satèl·lits i deixar que l'antena capti únicament els visibles, dels que rebrà una senyal. No obstant, només se'n marquen entre 4 i 6 per evitar sobrecarregar el processador i tenir més memòria per computar la posició.

Al prémer el botó *Start* el programa s'inicia tenint en compte tots els paràmetres seleccionats, i envia a RTKLIB a través de RTCM les dades d'observació. Clicant el botó a l'esquerra de *Start*, indicat amb M, s'obre el sistema de monitoratge. En aquest s'hi mostra tot el que succeeix en el funcionament del programari, tant informacions nominals com errors que ocorrin. Durant un funcionament normal, a l'iniciar l'aplicació, apareixen un seguit de dades corresponents a la inicialització del programa. Seguidament, es busquen senyals procedent de la constel·lació. Les dades d'observació les rep l'aplicació RTKLIB, que computa la posició del receptor.

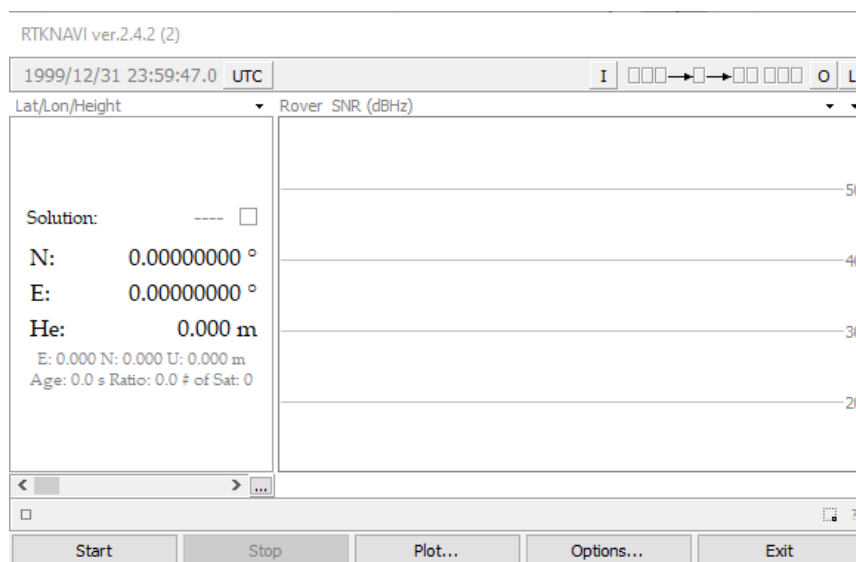


Figura 31: Interfície gràfica del programa RTKLIB. A la part central es mostra un gràfic de barres amb la intensitat de la senyal de cada satèl·lit que captura i les coordenades calculades. A la barra superior hi ha els panells per seleccionar l'entrada i sortida de dades. A la barra inferior hi ha els botons d'engegada i aturada i altres configuracions. Imatge pròpia.

Els missatges habituals de funcionament són els següents:

```
GNSS-SDRLIB Start!  
Waiting for connection  
Connected from 127.0.0.1
```

Aquestes notificacions indiquen que el programa GNSS-SDRLIB s'ha posat en marxa i que es manté a l'espera de que es connecti una font per rebre les dades. Un cop ho



aconsegueix, s'indica amb un missatge que conté l'adreça IP de la direcció.

```
**** G08 sdr thread 1 start! ****
```

Aquest missatge indica que el procés per captar senyals procedents del vuitè satèl·lit GPS s'ha iniciat. Va precedit del següent missatge:

```
G08, C/N0= 34,7, peak= 1,3, codei= 1214, freq= 200,0
```

que dona a conèixer les característiques del senyal que rep. Diu la relació de potencia entre el senyal i el soroll, el pic de potència, la fase del codi i la desviació en la freqüència obtinguda.

```
*** find preamble! G08 15215 1 ***
```

Quan l'antena capta un senyal amb la intensitat necessària i troba el preàmbul<sup>17</sup> d'una secció de les dades de navegació mostra aquest missatge. A partir d'aquest moment, aquest satèl·lit s'utilitzarà per al càlcul de la posició.

```
G08 ID=2 tow:380322,0 week=2225 cnt=23822
```

Un cop el senyal d'un satèl·lit es fa servir per al càlcul de la posició, el missatge de les característiques varia una mica i passa a mostrar la següent informació: la secció de les dades de navegació llegides, l'hora de la setmana en format GPST<sup>18</sup>, la setmana de GPST i el comptador del nombre de seccions de navegació s'han descodificat.

```
prn=8 rtm output navigation data
```

Quan s'inicia l'enviament de dades a través del protocol RTCM, s'indica amb aquest missatge.

```
SDR syncthread finished!
```

```
SDR channel G08 thread finished! Delay=0 [ms]
```

```
GNSS-SDRLIB is finished!
```

Un cop es decideix aturar el programa apareixen aquestes notificacions indicant que

---

<sup>17</sup> El preàmbul és una seqüència binària situada a l'inici de cada secció de les dades de navegació emprada per a una correcta sincronització i per indicar el començament d'una nova secció

<sup>18</sup> GPST, de les paraules angleses *Global Positioning System Time*, és una escala temporal pròpia dels satèl·lits GPS que no té en compte els segons intercalars de l'UTC.

els diferents canals de connexió amb els satèl·lits i el programa s'han tancat.

Abans d'iniciar el programa RTKLIB, primer s'ha de seleccionar la font de dades. Aquest pas es fa clicant el botó amb la lletra I, en la barra superior. S'obre la pestanya mostrada en la figura 32, on es poden seleccionar fins a tres entrades de dades. Les dues últimes (*Base Station* i *Correction*) serveixen per al càlcul de posició amb més d'un receptor, aportant correcció a les interferències i augmentant la precisió. En aquest cas, la prova es realitza amb una única entrada, en el canal anomenat *Rover*.

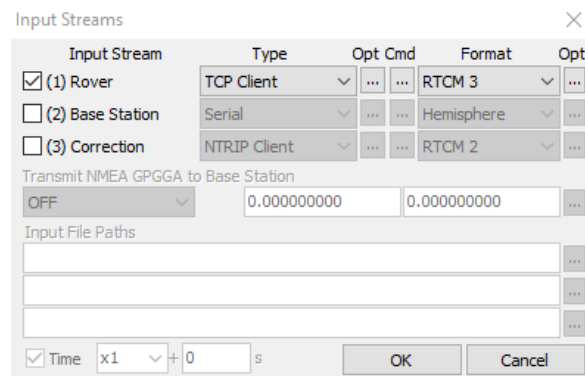


Figura 32: Finestra amb el menú de selecció d'entrades de dades al programa. A la imatge només hi ha marcada la primera opció amb el tipus d'entrada *TCP Client* en el format *RTCM 3*. Imatge pròpia.

Se selecciona el tipus d'entrada. Es pot triar un fitxer com a font de dades, però s'ha utilitzat el tipus Client TCP, ja que a l'anterior programa s'havia seleccionat la comunicació RTCM MSM. A les opcions de Client TCP hi apareixen dos camps per omplir l'adreça IP i el port de comunicació, tal i com es veu a la figura 33. A l'adreça IP, s'escriu *localhost*.

L'adreça IP és una combinació de nombres que permet identificar un dispositiu a la xarxa. No obstant, hi ha certes direccions IP reservades per a casos determinats. Per exemple, les adreces que comencen pel nombre 127 s'anomenen adreces de *loopback* local.

Aquestes tenen la funció de referenciar el propi dispositiu o la pròpia xarxa local. Així doncs, quan s'introdueix *localhost*,

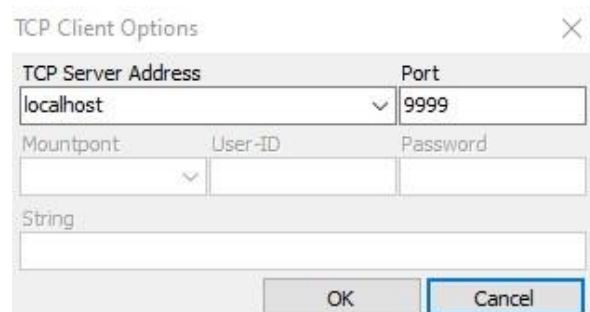


Figura 33: Finestra amb el menú d'opcions de la entrada de dades tipus *TCP Client*. A la casella d'adreça hi ha escrit la direcció *localhost* i a la casella de port, el 9999 està marcat. Imatge pròpia.

s'executa una sol·licitud a l'adreça 127.0.0.1, una sol·licitud al propi dispositiu. D'aquesta forma s'aconsegueix la comunicació entre programes. A més, a part de l'adreça IP, s'ha d'indicar el port que s'utilitza, que en aquest cas és el 9999.

La configuració de les dades d'entrada ja es troba completa. El següent pas és triar què es vol fer amb els resultats obtinguts. Perfectament, es podria no seleccionar cap sortida: només es mostrarien els resultats en pantalla sense ser desats ni enviats enlloc. En tot cas, per a les proves que s'han dut a terme amb aquest programa s'ha escollit guardar-les en un fitxer, per poder revisar-les i analitzar-les en el futur.

Per obrir la pestanya amb les opcions de sortida, només cal prémer la lletra O a la part dreta de la barra superior. El menú que s'obre dona dues opcions de sortida simultània. Per a les pràctiques, només se selecciona una del tipus *File* (Fitxer). A la primera casella de text s'introdueix el directori a l'ordinador per desar el fitxer creat pel programa.

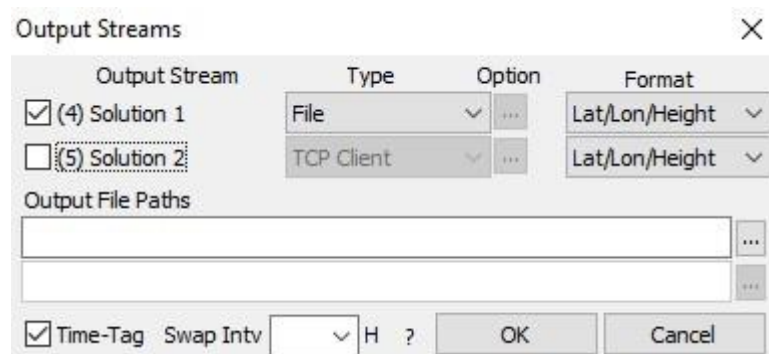


Figura 34: Finestra amb el menú d'opcions de la sortida de dades. En el cas de la imatge, hi ha seleccionat que es desin les dades en un fitxer. Imatge pròpia.

Amb aquests paràmetres establerts, ja es pot començar a calcular una posició amb les dades rebudes. Per iniciar la seqüència només cal clicar sobre el botó *Start* a la barra inferior de la interfície gràfica del programa.

Quan els dos programes estan en marxa, GNSS-SDRLIB processa els senyals rebuts dels satèl·lits GPS i traspasa la informació a RTKLIB, que calcula la posició i la mostra a l'usuari.

En ple funcionament, es mostra en un gràfic de barres la intensitat del senyal de cada satèl·lit. Quan les dades de navegació són rebudes per RTKLIB, aquestes barres prenen diferents colors: de verd quan la intensitat és excel·lent fins a gris quan és tan pobre que no s'utilitza per a la computació de la posició. Amb un mínim de 4 senyals vàlides amb una potència suficient RTKLIB pot calcular la localització.

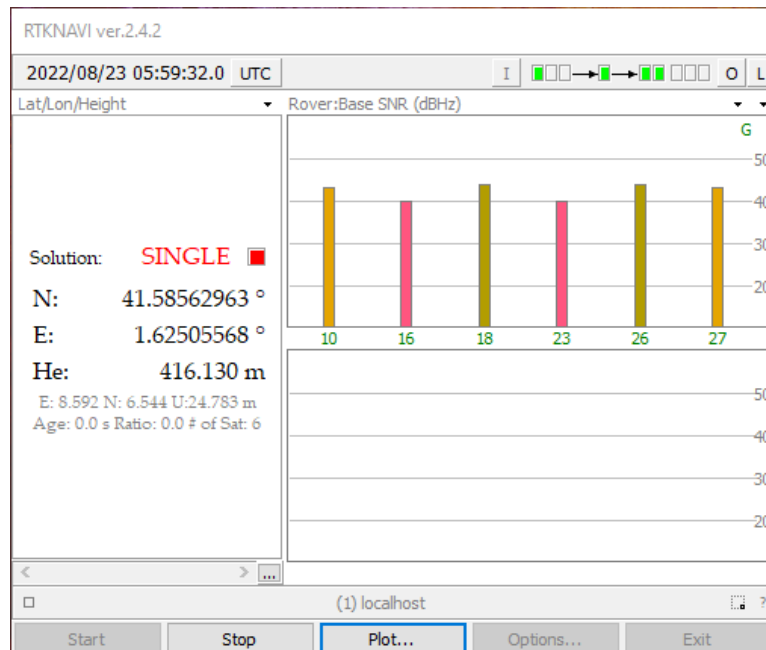


Figura 35: Interfície gràfica del programa RTKLIB en ple funcionament. Es poden veure 6 barres d'intensitat de senyal d'un color ataronjat ocupant la major part de la finestra. A la secció esquerra, es mostra la posició calculada en format de coordenades. Imatge pròpia.

A més, aquest programa té l'habilitat de mostrar en un eix de coordenades la posició calculada, aconseguint que els resultats obtinguts puguin ser analitzats amb més facilitat. També es pot incloure la imatge d'un mapa al fons. Prement la tecla *Plot* a la pantalla inicial, a la barra inferior, s'activa aquesta eina.

En el moment de fer aquesta activitat, l'antena estava estacionària, és a dir, estava col·locada en un punt fix sense moure's en cap moment. És per això que és rellevant destacar la separació dels punts a l'eina *Plot*. Per lògica, un pensaria que si l'antena estigués fixa en un lloc, la posició que s'obtidria també seria una sola. En canvi, aquest fet no passa, realment apareix un núvol de punts en els que el receptor es

troba. Això es deu als errors de mesura, explicat a l'apartat 5.5 d'aquest treball i visualitzat conceptualment a la figura 10.

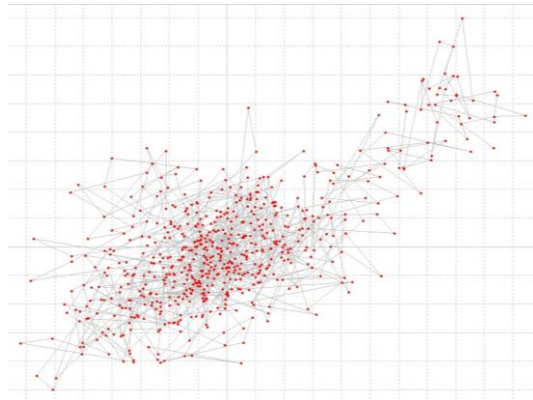


Figura 36: Representació gràfica de les posicions calculades usant la eina *Plot* de RTKLIB. Cada divisió de la graella correspon a 2 metres a la realitat. Imatge pròpia.

Amb tot, la posició calculada d'aquest cas té un error aproximat de 12 metres verticalment i de 16 metres horitzontalment respecte el punt mig.

No només es va realitzar una sola prova de determinació de posició: se'n van fer nombroses per acostumar-se a la dinàmica del funcionament dels programes i recol·lectar informació de tota mena. De totes les que es van fer, les dues de la figura 37 són bastant destacables.

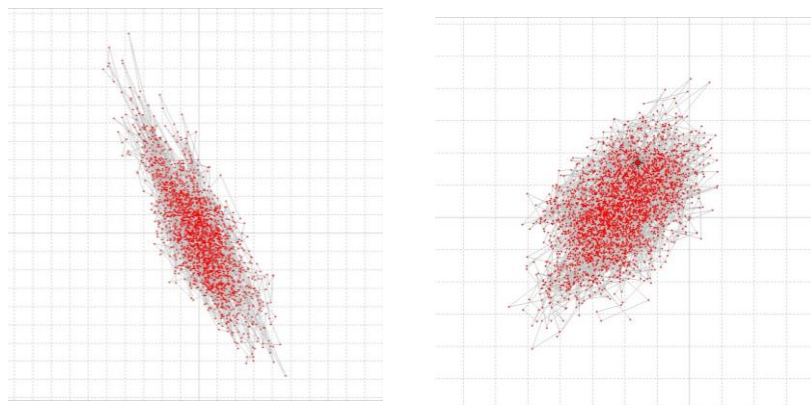


Figura 37: Representació gràfica de les posicions calculades en dues situacions diferents usant la eina *Plot* de RTKLIB. Cada divisió de la graella de les dues imatges correspon a 5 metres a la realitat. Imatges pròpies.

Les dues imatges corresponen a les proves realitzades en dos dies diferents, a hores diferents i a dos llocs diferents, ambdues amb l'antena estacionària. A simple vista, s'observa que formen núvols de punts amb formes prou diferents. La imatge de la

figura 37 de l'esquerra té una forma allargada i estreta, mentre que l'altre imatge té una silueta esfèrica.

Amb aquestes dues fotografies es veu representat amb bastanta claredat l'efecte de la geometria satel·lital, com l'arranjament geomètric dels satèl·lits utilitzats repercuteix en la precisió del sistema.

### 8.3. Prova 3: Determinació de la posició en moviment i comparació amb el receptor d'un telèfon mòbil

Per a la tercera i última prova l'objectiu és comparar la posició computada pel receptor SDR amb la posició obtinguda en un telèfon mòbil, amb els dos aparells en moviment dins d'un vehicle automòbil. La ruta estarà compresa per dues etapes:

- Una part urbana: una zona de conducció a velocitats reduïdes, amb acceleracions irregulars i angles de gir aproximadament de 90 graus i obstrucció per part d'edificis i altres objectes de la via pública.
- Una part a la carretera, una zona de conducció a velocitats altes constants, corbes lleugeres i bona visibilitat del cel (sense massa obstacles verticals).

Aquestes diferències entre els dos trams posen els receptors en entorns de treball completament desiguals. D'aquesta manera es visualitzarà el funcionament de l'aparell SDR en condicions noves. Així doncs, per a aquest test es faran servir el dispositiu SDR, l'antena activa sintonitzada a la freqüència GPS, un ordinador i un telèfon mòbil.

El primer punt a tenir en compte és la instal·lació de l'antena al vehicle que s'utilitza i assegurar-ne la seguretat. Un major d'edat amb permís de conducció pertinent tindrà el control del cotxe en tot moment i no rebrà cap mena de distracció per part de la persona que realitza la prova, que s'asseurà en un dels seients posteriors. L'antena té una cara magnètica, que fa que s'uneixi fortament amb superfícies metàl·liques. D'aquesta forma, es col·loca l'antena al sostre del cotxe, amb el cable entrant per la finestra. Amb tres trossos de cinta adhesiva, s'assegura que ni el cable ni l'antena es moguin lliurement per la zona. La instal·lació d'aquests components es pot veure a la figura 38.



Figura 38: Instal·lació de l'antena al sostre del cotxe, amb l'ajuda del seu imant incorporat i de tires de cinta adhesiva. Es veu com el cablejat baixa pel lateral del vehicle. Imatge pròpia.

Dins del cotxe, l'antena s'uneix al receptor SDR, que es connecta a l'ordinador. Per computar la posició es fan servir els mateixos programes que a la prova anterior: GNSS-SDRLIB i RTKLIB.

Per altra banda, al dispositiu mòbil s'ha fet ús d'una aplicació anomenada Geo Tracker. La qüestió és que altres programes de localització, com ara Google Maps, limiten les possibilitats de trobar la posició en els carrers que hi ha predeterminats. La posició que troba la representa sobre un carrer i no en un espai lliure. En canvi, amb l'aplicació Geo Tracker no passa això, sinó que indica la localització exacta (amb els seus errors i irregularitats) que es mesura al telèfon, sense importar si es tracta d'un carrer o una carretera. També permet descarregar els fitxers amb tot el trajecte calculat, així analitzar-los amb eines en un ordinador.

A més d'això, també s'han hagut de modificar alguns paràmetres de la configuració de la ubicació del telèfon mòbil. Principalment es toquen dos elements:

- Desactivació de "Cerca de Wi-Fi i Bluetooth": aquesta característica permet que s'utilitzin les xarxes Wi-Fi properes i dispositius Bluetooth pròxims per millorar la ubicació.
- Desactivació de "Precisió d'ubicació de Google": aquest servei utilitza les xarxes Wi-Fi, dades mòbils i sensors per millorar la precisió de la posició.

Aquests canvis es duen a terme per fer que la localització mesurada al telèfon mòbil estigui basada en les mostres extretes directe de l'antena incorporada, sense cap element extra.

Amb tot, es procedeix a definir la ruta que se seguirà en tal pràctica. El trajecte és el dibuixat en la figura 39.



Figura 39. Ruta preparada per a la prova 3. Imatge pròpia generada amb Google Earth.  
<https://www.earth.google.com/web/>

Primerament hi ha un tram urbà, circulant per carrers de la ciutat. Hi ha diversos revolts i els carrers són diferents uns dels altres: n'hi ha unidireccionals estrets, n'hi ha de més amples amb arbres cobrint parcialment la visibilitat del cel, n'hi ha amb edificis alts i n'hi ha amb edificacions mitjanes un xic més amples. Posteriorment, es procedeix amb un tros a carretera, de quasi 6 quilòmetres. Aquesta part de la ruta és majoritàriament lliure d'obstruccions, excepte tres seguits de ponts al final del segment. Per finalitzar, se circularà per una zona industrial sense cap obstacle, a una velocitat més reduïda que a la carretera, fins a un punt pròxim al lloc de sortida.

Amb tot planificat, s'inicia el procés d'execució. S'activen simultàniament els dos sistemes de posicionament (SDR i telèfon mòbil) i es fa el recorregut preparat. A les figures 40 i 41 es mostra el resultat obtingut en els dos casos. Per a representar la posició del telèfon mòbil, s'ha traspassat el fitxer a l'ordinador i s'ha utilitzat l'aplicació Garmin BaseCamp per obrir-lo i analitzar-lo.

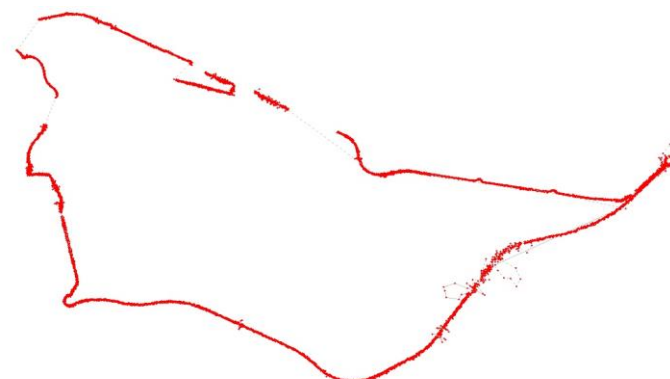


Figura 40: Representació de la posició calculada pel receptor SDR usant l'eina *Plot* del programa RTKLIB. Imatge pròpia.



A primera vista, ambdós resultats es veuen molt similars entre ells. Destaquen notablement els trams de la recepció amb el dispositiu SDR on no hi ha dades, sinó que s'aprecia que el traç és discontinu. En comparació amb la representació d'un telèfon mòbil, aquest sí que conté aquests trams i es manté constant en la totalitat de la ruta. A la figura 43 hi ha els segments on ocorre això.

Aquest fet es justifica amb les obstruccions per part d'elements exteriors. L'antena GPS és altament sensible als obstacles del seu entorn i fan que sigui impossible al receptor calcular la posició quan aquests pertorben la visió al cel. Les tres ocasions descrites corresponen al tram de circulació per una zona urbana.

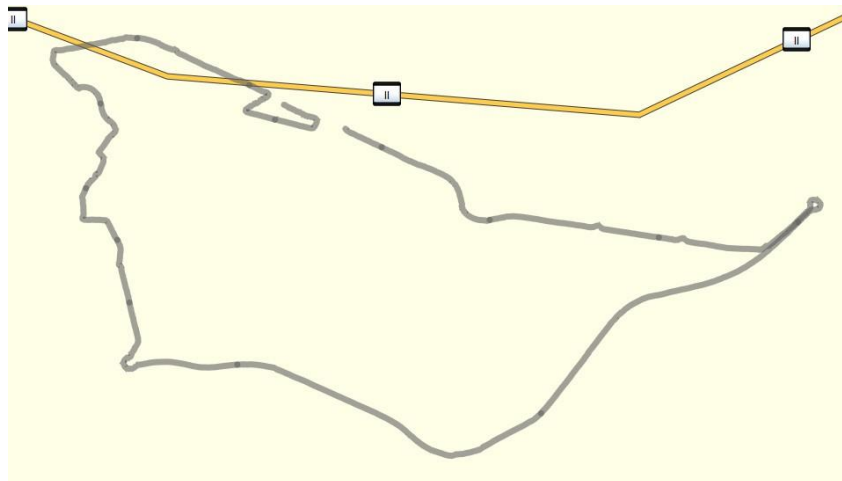


Figura 41: Representació de la posició calculada pel receptor del telèfon mòbil visualitzada en el programa Garmin BaseCamp. Imatge pròpia.

La pèrdua de la posició a la figura 43A coincideix amb el punt de la ciutat on hi ha un edifici alt i un carrer amb arbres frondosos a les dues bandes de la calçada. Quan s'arriba a una rotonda sense cap obstacle, el receptor és capaç de ubicar-se novament. La figura 43C també descriu la pèrdua en una zona urbana en la que hi havia arbres i habitatges a banda i banda del camí. La discontinuïtat en la figura 43E correspon en el pas per sota un pont i la distorsió per part d'arbres en el carrer.

No obstant, també hi ha zones en les que no s'ha interromput el càlcul de la posició, però sí que es pot deduir que s'ha circulat a través d'un obstacle a partir de les marques que reflecteixen una pèrdua de la precisió. Una pèrdua de la precisió es pot apreciar en la representació gràfica, quan els punts que formen una línia es dispersen lateralment. A la figura 44 es visualitzen en tots els cops que s'ha experimentat aquest fenomen mentre se circulava en el tram urbà.

Per altra banda, el tram mesurat a la carretera és la línia inferior que travessa els gràfics de les figures 40 i 41 d'esquerra a dreta. Aquest tram a alta velocitat és bastant precís amb la realitat i els dos receptors han calculat una posició prou semblant. L'únic lloc on no coincideixen les dues mesures és el que es veu a la figura 45. Aquesta pèrdua de la posició exacta i passar a obtenir un espai ampli amb punts es deu a la circulació per sota de 8 punts consecutius en poc temps. Així doncs, aquesta distorsió en la exactitud de la posició es a causa d'obstruccions que impedeixen que el senyal del satèl·lit sigui rebut correctament.

Un també es pot fixar en les semblances i diferències entre els trams mesurats amb una velocitat alta i els trams mesurats a velocitats reduïdes. Quan es condueix a velocitats altes, la densitat de punts en una zona determinada és menor. Com que els receptors es troben en moviment, el mateix nombre de mesures es prenen en un espai més gran que si s'estigués en estàtic o a una velocitat més lenta. En canvi, quan es condueix a una velocitat lenta, la densitat de punts en una zona determinada és major.

A més, el traç que es representa quan se circula a una velocitat ràpida és molt més regular i recte que el traç que es visualitza al prendre mesures a una velocitat baixa. Es destaca també que, a la representació gràfica de la figura 42A, es visualitzen petits punts condensats de mesures. Això passa per la mateixa raó: com que el receptor es troba a una velocitat molt baixa, els mateixos errors que es podrien dissimular (es dissimulen perquè a una velocitat alta es recorre una distància major i queden repartits en una àrea major), ara es visualitzen en una àrea més petita. És similar, però en una escala menor, al núvol de punts descrit a la figura 36.

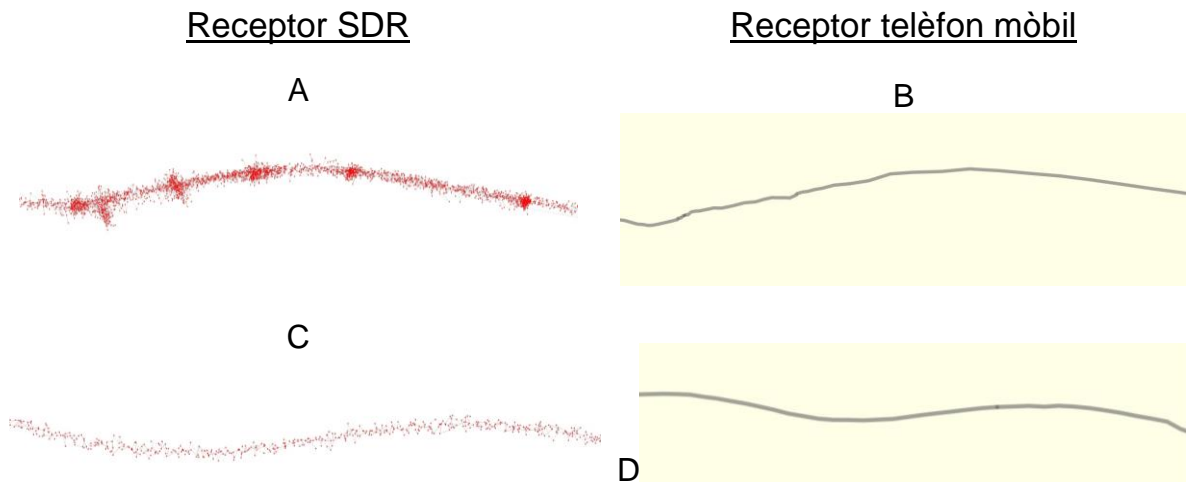


Figura 42: Imatges amb la comparativa entre el receptor SDR i el receptor d'un telèfon mòbil en termes velocitat. La fotografia A correspon al tram conduït a una velocitat baixa. La fotografia B és de la ubicació del mòbil en el mateix tram i a la mateixa velocitat. La fotografia C representa el segment que es va mesurar amb una velocitat altra. A la fotografia D es mostra el mateix tram amb la mateixa velocitat. Imatges pròpies.

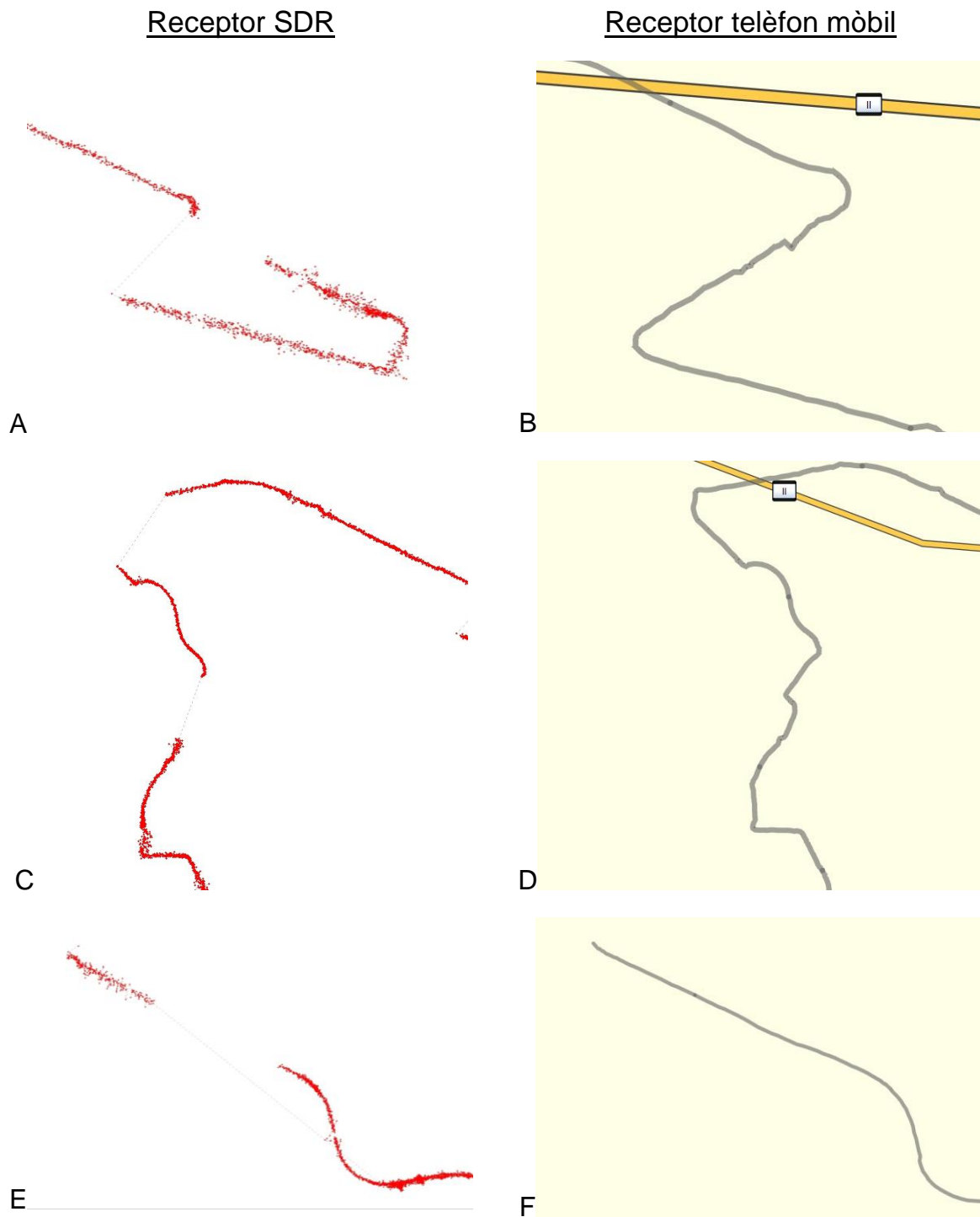


Figura 43: Imatges amb la comparativa entre el receptor SDR i el receptor d'un telèfon mòbil en termes de manca de dades. Les fotografies A, C i E corresponen als trams on el receptor SDR no ha pogut calcular la posició. Les fotografies B, D i F són de la ubicació del mòbil en els mateixos trams Imatges pròpies.

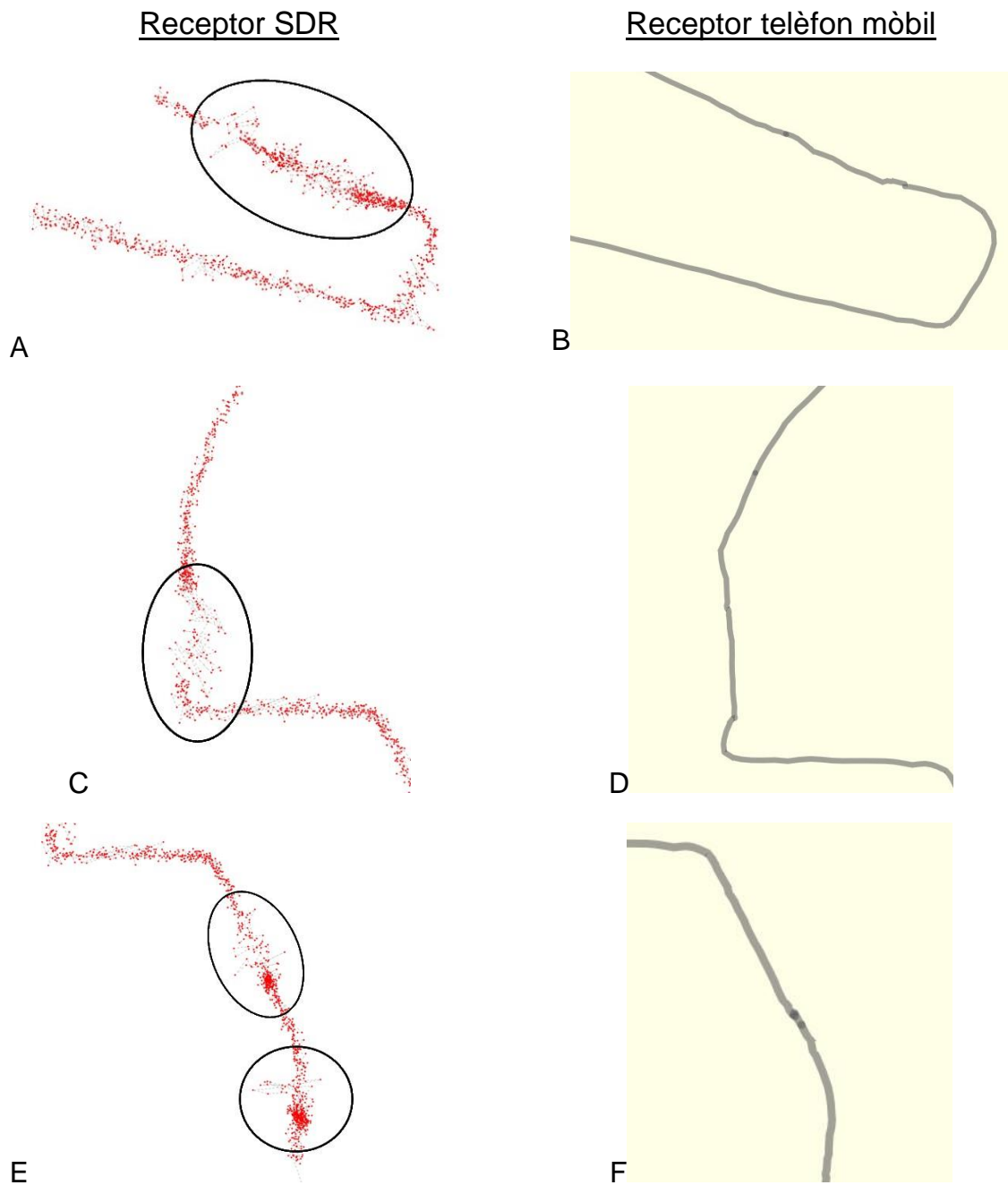


Figura 44: Imatges amb la comparativa entre el receptor SDR i el receptor d'un telèfon mòbil en termes de pèrdua de precisió. Les fotografies A, C i E corresponen als trams on el receptor SDR no ha pogut calcular la posició amb suficient precisió. S'indiquen els punts on s'aprecia això amb un cercle negre. Les fotografies B, D i F mostren la ubicació del telèfon mòbil en els mateixos trams. Imatges pròpies.

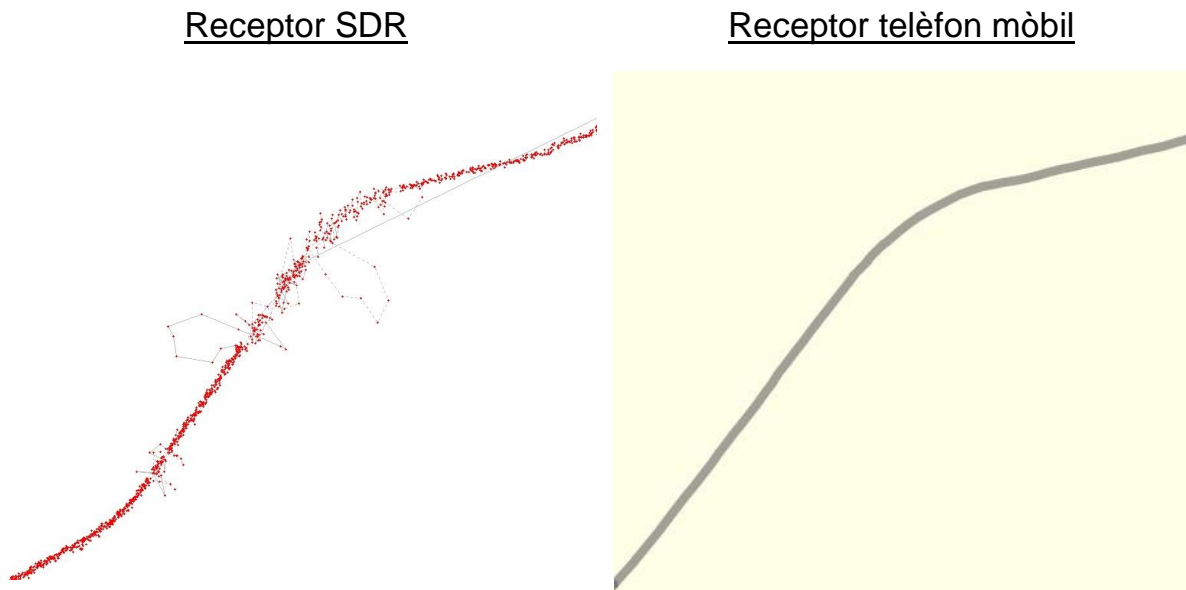


Figura 45: Imatges amb la comparativa entre el receptor SDR i el receptor d'un telèfon mòbil en la posició en el tram final de la zona de carretera. La fotografia de l'esquerra mostra la posició enregistrada pel dispositiu SDR. Es veu que hi ha poca exactitud en la ubicació, a causa d'obstruccions a la via. La imatge de la dreta mostra la ubicació del telèfon mòbil en els mateixos trams. Imatges pròpies.



Figura 46: Imatges que mostra la posició dels ponts en l'últim tram descrit a la figura 45. La línia de color blau indica la ruta seguida, usant Google Earth per representar-ho. Els rectangles de color vermell marquen els llocs on es troben els ponts. Imatge pròpia.

## 9. Conclusions del treball

Aquest treball s'ha redactat amb la intenció de comprovar la hipòtesi formulada al principi del projecte: comprovar que l'aplicació del sistema format pel dispositiu SDR i l'antena GPS és útil, fiable i precisa i més recomanable que l'ús d'un telèfon mòbil.

Primer de tot s'han donat a conèixer els principals sistemes de navegació per satèl·lit, els responsables de què la població del món pugui saber en quin lloc del planeta es troba en tot moment. També s'ha indagat en els processos necessaris per calcular una posició: des dels components del senyal fins als càlculs matemàtics involucrats, passant pels errors arrossegats en el procediment.

En relació a la radionavegació:

1. La radionavegació ja és una tecnologia molt desenvolupada: es van iniciar els primers projectes entre els anys 60 i 70, i des d'aquell moment no ha parat d'evolucionar. Han aparegut diversos mètodes per a la determinació de la posició, tots seguint el mateix principi.
2. Els sistemes de navegació per satèl·lit són serveis de comunicació unidireccionals: només és el satèl·lit el que envia ones electromagnètiques i els receptors es limiten a "escoltar" aquests senyals per processar-los.
3. Hi ha moltes possibilitats d'adquirir errors en la transmissió del senyal, provocant que sigui pràcticament impossible calcular una posició exacta, sinó que es forma una zona on el receptor s'hi pot trobar. Aquesta és una tecnologia extremadament precisa i la mínima variació provoca distorsions que alteren enormement els càlculs de posició.

Després, s'ha fet recerca sobre les ràdios definides per *software*. Són uns aparells que pretenen innovar el sector de la recepció de senyals, substituint peces físiques per programari. S'ha comparat un receptor SDR amb una ràdio tradicional i se n'han descrit els components destacables.

En relació al concepte de ràdio definida per *software*:

1. Els elements del *front-end*, els components que processen el senyal tal i com el capta l'antena, es troben físics encara que molts elements se substitueixin per línies de codi. Això és a causa de la necessitat de processar el senyal abans de digitalitzar-lo per augmentar el rendiment de conjunt. També permet que els pròxims elements només estiguin calibrats a una freqüència intermèdia.
2. Un cop l'ona ha estat digitalitzada, es poden dur a terme tasques molt variades canviant el *software* que s'utilitza, tot i estar rebent el mateix senyal.

Finalment, el treball culmina en busca d'una resposta a la hipòtesi amb la part pràctica. Aquí s'han comprovat conceptes coneguts en el projecte i s'han posat a prova les capacitats dels sistemes GPS i els receptors SDR.

De tot això es pot concloure el següent:

1. És possible arribar a la implementació d'un aparell SDR que, usant els serveis de la constel·lació GPS, pugui calcular la posició del mateix receptor.
2. Un receptor SDR té múltiples aplicacions, totes emprant les ones electromagnètiques. Es poden dur a terme tant tasques d'audició d'una emissora de ràdio com de recepció de senyals transmesos per satèl·lits.
3. En estàtic, no s'aconsegueix una única posició exacta, sinó que apareix representat un cúmul de punts ocupant una extensa zona degut als errors arrossegats pel senyal en tot el procés. Depenent de les circumstàncies a l'hora de la mesura (ja sigui el moment del dia o el nombre de satèl·lits visibles i la seva col·locació al cel) aquest cúmul de punts es representa en formes més rodones o més allargades.
4. En dinàmic, la representació del moviment és coincident amb la realitat. No obstant això, l'antena és altament sensible a les obstruccions d'edificis, arbres i altres objectes que dificulten la visió al cel. Aquest fet causa la pèrdua temporal de la connexió amb el satèl·lit i la interrupció del càlcul de la posició.



5. Per altra banda, el receptor incorporat al telèfon mòbil és capaç de superar aquestes dificultats i ofereix la localització independentment de l'existència d'obstacles propers.
6. La comparativa dels dos resultat conclou que, actualment, un receptor GPS d'un telèfon mòbil és més precís i fiable, ja que aconsegueix una mesura contínua i acurada sota les mateixes condicions que un receptor SDR.

El futur per les ràdios definides per *software* és molt optimista i pròsper. El món es desplaça cap a una societat modernitzada, tecnològica i sense fils. L'aparició i desenvolupament de l'Internet de les Coses (*Internet of Things*) i el naixement del 5G augmentaran la necessitat de receptors per captar senyals provinents de molts orígens. Què millor que els dispositius SDR per cobrir tal demanda amb tots els avantatges que tenen. Amb l'evolució de la tecnologia per reduir el pes, mida i cost de xips electrònics, els aparells SDR tindran millors prestacions i seran més accessibles a la societat en general. Les ràdios definides per *software* no són més que una innovació en plena evolució, que en un període de temps molt curt seran capaces de resoldre molts problemes actuals i acabar sent un producte totalment essencial en la vida i convivència humana.

## 10. Referències i fonts d'informació

### 10.1. Fonts bibliogràfiques

Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design*. Wiley.

Borre, K. (2007). *A software-defined Gps and Galileo receiver*. Birkhäuser Boston.

Carr, J. J. (2001). *The Technician's Radio Receiver Handbook: Wireless and Telecommunication Technology*. Newnes.

Jeffrey, C. (2010). *An introduction to GNSS: Gps, Glonass, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems*. NovAtel.

Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2006). *Understanding Gps: Principles and applications*. Artech House.

Ludwig, R., & Bretchko, P. (2000). *Rf circuit design: Theory and applications*. Prentice Hall.

Misra, P., & Enge, P. (2011). *Global Positioning System: Signals, measurements, and performance*. Ganga-Jamuna Press.

Rudersdorfer, R., Graf, U., Zahnd, H., & Buesching, G. K. (2014). *Radio Receiver Technology: Principles, architectures and applications*. John Wiley & Sons, Ltd.

### 10.2. Fonts digitals

All about circuits. How to demodulate digital phase modulation. [en línia] <<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/radio-frequency-demodulation/how-to-demodulate-digital-phase-modulation/>> [Consulta: 29 de setembre de 2022]

Aruba Networks. Frequency, Cycle, Wavelength, Amplitude and Phase. [en línia] 2015. <<https://blogs.arubanetworks.com/industries/frequency-cycle-wavelength-amplitude-and-phase/>> [Consulta: 18 d'agost de 2022]

Beckner, Alex i Swan, Michael. An introduction to software defined radio. [en línia] <<https://sites.google.com/site/sdrbuild/history-theory>> [Consulta: 3 d'octubre de 2022]

Britannica. Transistors and Moore's law. [en línia] <<https://www.britannica.com/technology/transistor/Transistors-and-Moores-law>> [Consulta: 18 d'octubre de 2022]

Bureau International des Poids et Mesures. Unit of time (seconds) a través de Internet Archive: Wayback machine. [en línia] 2011. <[https://web.archive.org/web/20110812055450/http://www.bipm.org/en/si/base\\_units/second.html](https://web.archive.org/web/20110812055450/http://www.bipm.org/en/si/base_units/second.html)> [Consulta: 4 d'agost de 2022]

Dummies. Radio electronics: transmitters and receivers. [en línia] 2016. <<https://www.dummies.com/article/technology/electronics/circuitry/radio-electronics-transmitters-and-receivers-179838/>> [Consulta: 14 de juliol de 2022]

El Tamiz. Efecto Joule. [en línia] 2013. <<https://eltamiz.com/2010/01/13/electricidad-i-efecto-joule/>> [Consulta: 20 de setembre de 2022]

Electrical 4U. Band Pass Filter: Circuit & Transfer function. [en línia] 2021. <<https://www.electrical4u.com/band-pass-filter/>> [Consulta: 29 de juny de 2022]

EIProCus. Transistor as an amplifier - Circuit diagram and its working. [en línia] <<https://www.elprocus.com/transistor-as-an-amplifier-circuit-diagram-and-its-working/>> [Consulta: 18 d'octubre de 2022]

ES Components. Passive electronics components - Just what are they? [en línia] 2017. <<https://www.escomponents.com/blog/2017/10/9/passive-electronic-components-just-what-are-they>> [Consulta 14 de juliol de 2022]

European Space Agency. Galileo begins serving the globe. [en línia] 2016. <[https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo\\_begins\\_serving\\_the\\_globe](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo_begins_serving_the_globe)> [Consulta: 5 d'agost de 2022]

European Space Agency. Power Systems. [en línia]  
<[https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Power\\_Systems](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Power_Systems)> [Consulta: 6 de juliol de 2022]

European Union Agency for the Space Programme. Galileo System. [en línia]  
<<https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>> [Consulta: 5 d'agost de 2022]

EverythingRF. What is a Bias Tee? [en línia] 2021.  
<<https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-bias-tee>> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

EverythingRF. What is Dilution of Precision. [en línia] 2022.  
<<https://www.everythingrf.com/community/what-is-dilution-of-precision>> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

GisGeography. GPS Accuracy: HDOP, PDOP, GDOP, Multipath & the atmosphere. [en línia] 2022. <<https://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath/>> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

GPS.gov. Space segment. [en línia] 2022. <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>> [Consulta: 11 d'agost de 2022]

HowStuffWorks. How Capacitors Work. [en línia] 2021.  
<<https://electronics.howstuffworks.com/capacitor.htm>> [Consulta: 27 de setembre de 2022]

HowStuffWorks. How inductors Work. [en línia]  
<<https://electronics.howstuffworks.com/inductor.htm>> [Consulta: 14 de juliol de 2022]

HowStuffWorks. How oscillators work. [en línia]  
<<https://electronics.howstuffworks.com/oscillator.htm>> [Consulta: 4 d'octubre de 2022]

Hubspot. What is Localhost? [en línia] 2022. <<https://blog.hubspot.com/website/what-is-localhost>> [Consulta: 3 d'octubre de 2022]

Institute of Electrical and Electronics Engineers Technology Navigator. Binary Phase Shift Keying (PSK). [en línia] <<https://technav.ieee.org/topic/binary-phase-shift-keying>> [Consulta: 19 d'agost de 2022]

Kowoma. GPS Explained: Transmitted GPS signals. a través de Archive today: webpage capture [en línia] 2012. <<https://archive.ph/20120804185510/http://www.kowoma.de/en/gps/signals.htm>> [Consulta: 19 d'agost de 2022]

LuaRadio. New to SDR? [en línia] <<https://luaradio.io/new-to-sdr.html>> [Consulta: 4 d'octubre de 2022]

Nasa Earth Observatory. Catalog of Earth Satellite Orbits. [en línia] 2009. <<https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog/page1.php>> [Consulta: 5 d'agost de 2022]

Nasa for students. What is a satellite?. [en línia] 2014. <<https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html>> [Consulta: 25 de maig de 2022]

Nasa science: Share the science. Anatomy of an electromagnetic wave. [en línia] 2022. <[https://science.nasa.gov/ems/02\\_anatomy](https://science.nasa.gov/ems/02_anatomy)> [Consulta: 24 de maig de 2022]

Navipedia. An intuitive approach to the GNSS positioning. [en línia] 2014. <[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/An\\_intuitive\\_approach\\_to\\_the\\_GNSS\\_positioning](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/An_intuitive_approach_to_the_GNSS_positioning)> [Consulta: 5 de juliol de 2022]

Navipedia. Beidou General Introduction. [en línia] 2018. <[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou\\_General\\_Introduction](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction)> [Consulta: 16 de novembre de 2022]

Navipedia. Galileo Space Segment. [en línia] 2021 <[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_Space\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Space_Segment)> [Consulta: 5 d'agost de 2022]

Navipedia. GNSS Basic Observables. [en línia] 2020.  
<[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_Basic\\_Observables](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Basic_Observables)> [Consulta: 6 de juliol de 2022]

Navipedia. GNSS Signal. [en línia] 2014.  
<[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_signal](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal)> [Consulta: 13 d'agost de 2022]

Navipedia. GPS Space Segment. [en línia] 2020.  
<[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_Space\\_Segment](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Space_Segment)> [Consulta: 11 d'agost de 2022]

Navipedia. Multipath. [en línia] 2012.  
<<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Multipath>> [Consulta: 5 d'agost de 2022]

OHB systems. Attitude Control System. [en línia] <<https://www.ohb-system.de/position-control.html>> [Consulta: 6 de juliol de 2022]

OneSDR. An introduction to low noise amplifier specifications. [en línia]  
<<https://www.onesdr.com/2020/01/11/an-introduction-to-low-noise-amplifier-specifications/>> [Consulta: 3 d'octubre de 2022]

OneSDR. What is a Bias Tee? [en línia] 2022.  
<<https://www.onesdr.com/2020/01/19/what-is-a-bias-tee/>> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

Science direct. Software Defined Radio. [en línia]  
<<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/software-defined-radio>>  
[Consulta: 8 d'agost de 2022]

Simple English Wikipedia: the free encyclopedia. Atomic clock. [en línia] 2021  
<[https://simple.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_clock](https://simple.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock)> [Consulta: 2 d'agost de 2022]

Space.com. Navstar: GPS Satellite network. [en línia] 2018.  
<<https://www.space.com/19794-navstar.html>> [Consulta: 6 de juliol de 2022]

Space.com. What is a satellite? [En línia] 2022. <<https://www.space.com/24839-satellites.html>> [Consulta: 6 de juliol de 2022]

Studio 22. dbFS. [en línia] 2019. <<https://www.studio-22.com/blog/enciclopedia/dbfs>> [Consulta: 1 de desembre de 2022]

Tallysman. GNSS Positioning techniques. [en línia] <<https://www.tallysman.com/gnss-positioning-techniques/>> [Consulta: 5 de juliol de 2022]

Texas A&M University. The GPS. [en línia] <<https://www.math.tamu.edu/~dallen/physics/gps/gps.htm>> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

Tutorials Point. Difference between BJT and FET. [en línia] <<https://www.tutorialspoint.com/difference-between-bjt-and-fet#>> [Consulta: 10 de novembre de 2022]

Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure. Ona. [en línia] 2022. <<https://ca.wikipedia.org/wiki/Ona>> [Consulta: 24 de maig de 2022]

Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure. Velocitat de la llum. [en línia] 2022. <[https://ca.wikipedia.org/wiki/Velocitat\\_de\\_la\\_llum](https://ca.wikipedia.org/wiki/Velocitat_de_la_llum)> [Consulta: 24 de maig de 2022]

Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure. Convertidor analògic-digital. [en línia] 2022. <[https://ca.wikipedia.org/wiki/Convertidor\\_anal%C3%B2gic-digital](https://ca.wikipedia.org/wiki/Convertidor_anal%C3%B2gic-digital)> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure. Quantificació (processament de senyal). [en línia] 2022. <[https://ca.wikipedia.org/wiki/Quantificaci%C3%B3\\_\(processament\\_de\\_senyal\)](https://ca.wikipedia.org/wiki/Quantificaci%C3%B3_(processament_de_senyal))> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure. Zenit. [en línia] 2021. <<https://ca.wikipedia.org/wiki/Zenit>> [Consulta: 31 d'agost de 2022]

Viquipèdia: l'enciclopèdia lliure. CDMA [en línia] 2022. <<https://ca.wikipedia.org/wiki/CDMA>> [Consulta: 12 d'octubre de 2022]

Viquipèdia: l'enciclopèdia lliure. Modulació per desplaçament de fase. [en línia] 2022.  
<[https://ca.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3\\_per\\_despla%C3%A7ament\\_de\\_fase](https://ca.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3_per_despla%C3%A7ament_de_fase)> [Consulta: 19 d'agost de 2022]

Western Washington University: College of the environment. GPS Ephemeris Data. [en línia] <<https://cenv.wwu.edu/sal/gps-ephemeris-data>> [Consulta: 16 d'agost de 2022]

Wikipedia, la enciclopedia libre. Resistor. [en línia] 2022.  
<<https://es.wikipedia.org/wiki/Resistor>> [Consulta: 20 de setembre de 2020]

Wikipedia, the free encyclopedia. Analog-to-digital converter. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter)> [Consulta: 13 d'octubre de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. BeiDou. [en línia]  
<<https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou>> [Consulta 16 de novembre de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. Electromagnetic radiation. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation)> [Consulta: 24 de maig de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. Error analysis for the Global Positioning System. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Error\\_analysis\\_for\\_the\\_Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Error_analysis_for_the_Global_Positioning_System)> [Consulta: 11 d'agost de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. Frequency mixer. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency\\_mixer](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_mixer)> [Consulta: 4 d'octubre de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. GLONASS. [en línia] 2022.  
<<https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS>> [Consulta: 9 d'agost de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. GPS signals. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/GPS\\_signals](https://en.wikipedia.org/wiki/GPS_signals)> [Consulta: 19 d'agost de 2022]



Wikipedia, the free encyclopedia. History of GLONASS. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_GLONASS](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_GLONASS)> [Consulta: 9 d'agost de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. Phase velocity. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Phase\\_velocity](https://en.wikipedia.org/wiki/Phase_velocity)> [Consulta: 24 de maig de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. Pseudorandom noise. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorandom\\_noise](https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorandom_noise)> [Consulta: 13 d'agost de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. RLC circuit. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/RLC\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/RLC_circuit)> [Consulta: 27 de setembre de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. Signal-to-noise ratio. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio)> [Consulta: 3 d'octubre de 2022]

Wikipedia, the free encyclopedia. Superheterodyne receiver. [en línia] 2022.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Superheterodyne\\_receiver](https://en.wikipedia.org/wiki/Superheterodyne_receiver)> [Consulta: 4 d'octubre de 2022]

Wolfram mathworld. XOR. [en línia] 2022. <<https://mathworld.wolfram.com/XOR.html>>  
[Consulta: 18 d'agost de 2022]

## 11. Annex 1: Taula comparativa de les característiques dels diferents sistemes de navegació per satèl·lit

	GPS	Galileo	GLONASS	BeiDou
Nombre de satèl·lits en òrbita	32	28	26	42
Nombre de satèl·lits en funcionament	24	23	24	30
Nombre de plans orbitals	6	3	3	7
Tipus d'òrbita dels satèl·lits	MEO	MEO	MEO	Geostacionària, geosíncrona inclinada i MEO
Precisió del sistema	5 - 10 metres	4 - 8 metres	2,8 - 10 metres	2,6 - 3,6 metres
Altura sobre la Terra de les òrbites	20.180 quilòmetres	23.222 quilòmetres	19.130 quilòmetres	Variable, en funció del tipus d'òrbita