

ESEIAAT



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# Disseny i Construcció d'una Antena

---

## Memòria

**Curs:** Màster en Enginyeria Aeronàutica

**Assignatura:** Transport Aeri i Sistemes de Navegació

**Data d'entrega:** 27-06-2018

**Estudiants:**

González García, Sílvia

Kaloyanov Naydenov, Boyan

**Professor:** Barlabé Dalmau, Antoni



## LLISTA DE CONTINGUTS

# Llista de continguts

<b>Llista de figures</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>1</b>
<b>2 Anàlisi electromagnètic</b>	<b>2</b>
2.1 Antena dipol en $\lambda/2$ . . . . .	2
2.1.1 En espai lliure . . . . .	2
2.1.2 A certa distància d'un pla conductor perfecte . . . . .	3
2.1.3 Sobre un cilindre metàl·lic . . . . .	4
2.2 Antena monopol en $\lambda/4$ . . . . .	5
2.2.1 Sobre un pla conductor perfecte . . . . .	6
2.2.2 Sobre un cilindre metàl·lic . . . . .	7
<b>3 Antena Escollida</b>	<b>8</b>
3.1 Resistència aerodinàmica paràsita . . . . .	9
3.2 Construcció de l'Antena . . . . .	11
3.2.1 Balun . . . . .	12
3.2.2 Cap de l'antena . . . . .	13
3.3 Mesures . . . . .	14
3.3.1 Mesura del coeficient de reflexió $\Gamma$ . . . . .	15
3.3.2 Mesura del SWR . . . . .	16
3.3.3 Carta de Smith . . . . .	18
3.3.4 Altres . . . . .	18
<b>4 Conclusions</b>	<b>21</b>
<b>5 Bibliografia</b>	<b>23</b>

## LLISTA DE FIGURES

---

2.1	Diagrams de Radiació d'antena dipol en $\lambda/2$ en espai lliure . . . . .	2
2.2	. . . . .	3
2.3	Diagrams de Radiació d'antena dipol en $\lambda/2$ a una certa distància d'un pla conductor . . . . .	3
2.4	. . . . .	4
2.5	Diagrams de Radiació d'antena dipol en $\lambda/2$ sobre un cilindre metàl·lic . .	4
2.6	. . . . .	5
2.1	Diagrams de Radiació d'antena monopol en $\lambda/4$ sobre un pla conductor . .	6
2.2	. . . . .	6
2.3	Diagrams de Radiació d'antena monopol en $\lambda/4$ sobre un cilindre metàl·lic	7
2.4	. . . . .	7
3.1	Longitud de l'antena dipol a construir . . . . .	9
3.1	Visió Frontal malla . . . . .	10
3.2	Visió de la malla en perspectiva . . . . .	10
3.1	Materials emprats . . . . .	11
3.2	Diagrama Balun $\lambda/4$ . . . . .	12
3.3	Balun $\lambda/4$ construit . . . . .	12
3.4	Connexions realitzades . . . . .	13
3.5	Antena dipol construïda . . . . .	14
3.1	Context del laboratori . . . . .	14
3.2	$ \Gamma $ pel sistema connector-cable-balun-antena. 0.3 - 300 MHz . . . . .	15
3.3	$ \Gamma $ pel sistema connector-cable-balun-antena. 100 - 300 MHz . . . . .	16
3.4	<b>SWR</b> pel sistema connector-cable-balun-antena. 100 - 200 MHz . . . . .	17
3.5	Carta de Smith . . . . .	18
3.6	Comportament en recepció . . . . .	19
3.7	Realització experiment autònom . . . . .	20

# 1 | Introducció

El present treball complementa les classes teòriques de l'assignatura de Transport Aeri i Sistemes de Radionavegació impartida al màster d'Enginyeria Aeronàutica de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Els requisits estableixen que s'ha de construir una antena per un avió d'aviació general amb les següents prestacions:

- El marge de freqüències d'utilització ha de ser entre els **108 i els 137MHz**, és a dir, la banda aeronàutica [2], [4] i [3] dins de la banda VHF. La freqüència central de banda serà doncs  $f_c = 122\text{MHz}$ .
- La **polarització** ha de ser **horitzontal**.
- Es recomana que l'antena sigui **poc directiva** per tal de poder comunicar-se amb diverses estacions aleatoriament situades des de el fuselatge d'un avió.
- Ha d'aguantar **10W** en mode de transmissió.
- S'ha de tindre en compte el **drag paràsit** que genera, doncs és important que aquest no sigui significatiu. Per aquest tipus d'avions les velocitats màximes es torben sobre els 200kts.

A banda, es requereix que l'antena sigui també **econòmica**.

Vists els requisits i coneixent l'estat de l'art de les antenes emprades en avions, el projecte es centra les següents opcions:

- Antena dipol en  $\lambda/2$
- Antena monopol en  $\lambda/4$

A continuació es faran estudis electromagnètics teòrics, s'escolllirà una opció i finalment es mostraran els resultats experimentals de l'opció escollida i construïda.

## 2 | Anàlisi electromagnètic

El programa 4NEC, basat en popular sistema de modelat anomenat *NEC* que resol l'equació integral del camp elèctric(EFIE) i l'equació integral del camp magnètic(MFIE) permet fer un anàlisis força acurat d'antenes de fil. Així doncs, s'empra aquest programa *open-source* per dur a terme un anàlisi per a les diverses configuracions d'antenes comentades.

### 2.1 Antena dipol en $\lambda/2$

En aquesta secció s'estudia i analitza una antena dipol en  $\lambda/2$  per a diverses situacions.

#### 2.1.1 En espai lliure

Per l'antena dipol comentada situada en un espai lliure s'analitzen els digrames de radiació així com la directivitat i la impedància d'entrada.

##### Diagrams de Radiació

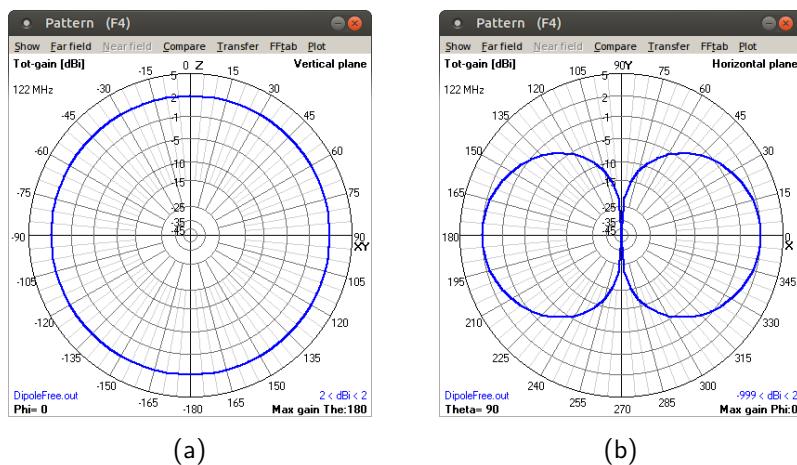
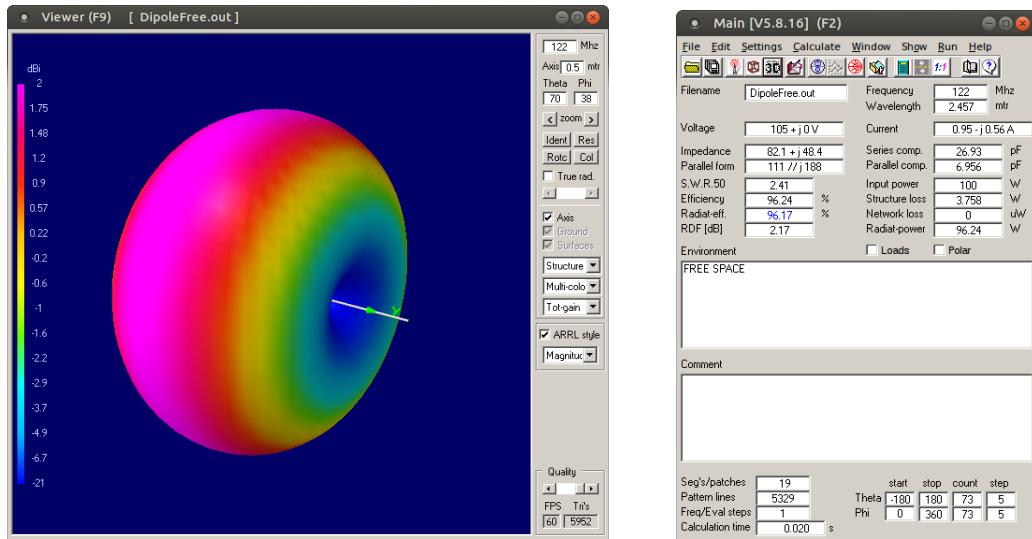


Figura 2.1: Diagrames de Radiació d'antena dipol en  $\lambda/2$  en espai lliure



(a) Digrama de Radiació 3D d'antena dipol en  $\lambda/2$  en espai lliure

(b) Dades de l'antena dipol en  $\lambda/2$  en espai lliure

Figura 2.2

**Directivitat de l'antena:**  $D = 2.17 \text{ dB}$ .

**Impedància d'entrada:**  $Z_0 = 82.1 + j48.4 \Omega$ .

### 2.1.2 A certa distància d'un pla conductor perfecte

Per l'antena dipol comentada situada a una certa distància d'un pla conductor s'analitzen els diagrames de radiació així com la directivitat i la impedància d'entrada.

#### Diagrams de Radiació

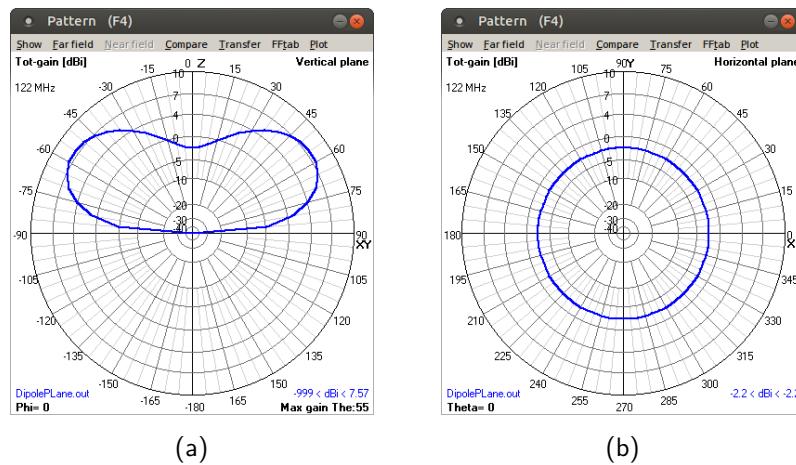
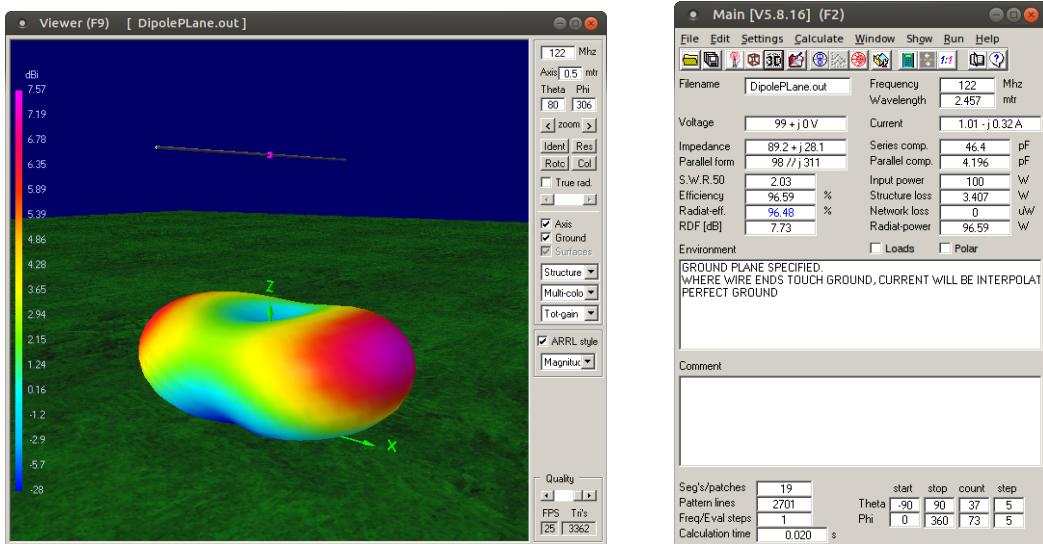


Figura 2.3: Diagrames de Radiació d'antena dipol en  $\lambda/2$  a una certa distància d'un pla conductor



(a) Digrama de Radiació 3D d'antena dipol en  $\lambda/2$  a una certa distància d'un pla conductor

(b) Dades de l'antena dipol en  $\lambda/2$  a distància d'un pla conductor

Figura 2.4

**Directivitat de l'antena:**  $D = 7.73 \text{ dB}$ .

**Impedància d'entrada:**  $Z_0 = 89.2 + j28.1 \Omega$ .

### 2.1.3 Sobre un cilindre metàl·lic

Per l'antena dipol comentada situada sobre un cilindre metàl·lic s'analitzen els diagrames de radiació així com la directivitat i la impedància d'entrada.

#### Diagrams de Radiació

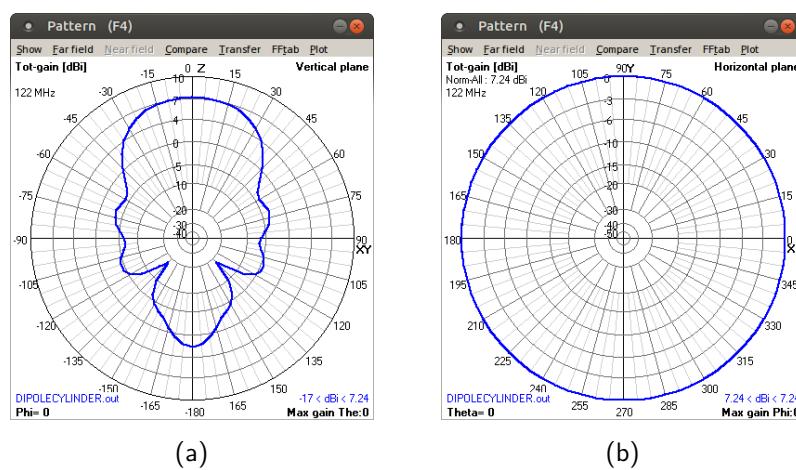


Figura 2.5: Diagrames de Radiació d'antena dipol en  $\lambda/2$  sobre un cilindre metàl·lic

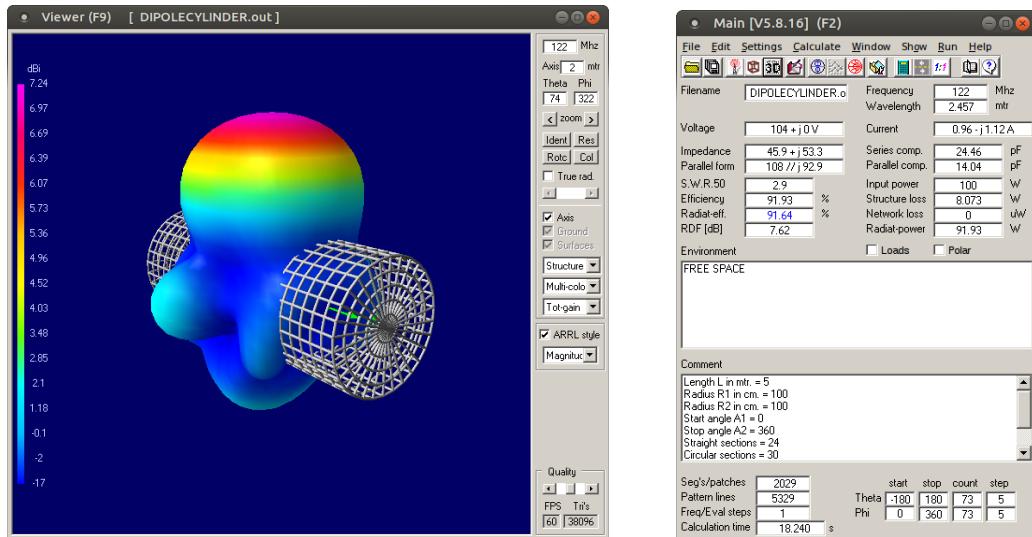


Figura 2.6

**Directivitat de l'antena:**  $D = 7.62 \text{ dB}$ .

**Impedància d'entrada:**  $Z_0 = 45.9 + j53.3 \Omega$ .

## 2.2 Antena monopol en $\lambda/4$

En aquesta secció s'estudia i analitza una antena monopol en  $\lambda/4$  per a diverses situacions.

## 2.2.1 Sobre un pla conductor perfecte

Per l'antena monopol comentada situada sobre un pla conductor s'analitzen els diagrames de radiació així com la directivitat i la impedància d'entrada.

### Diagrams de Radiació

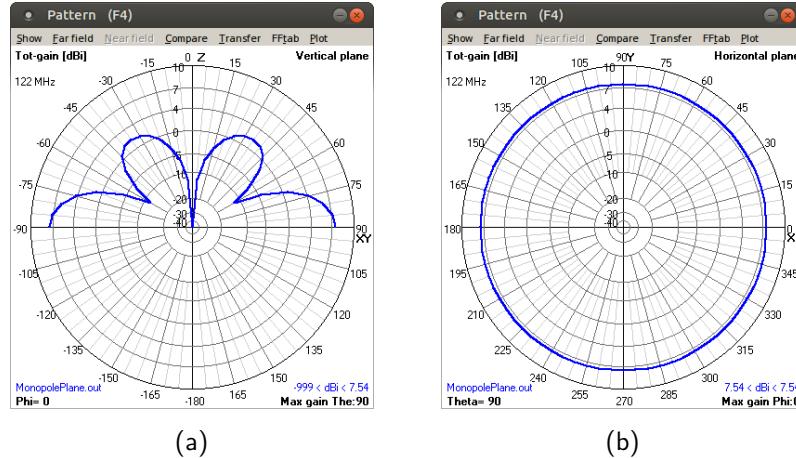
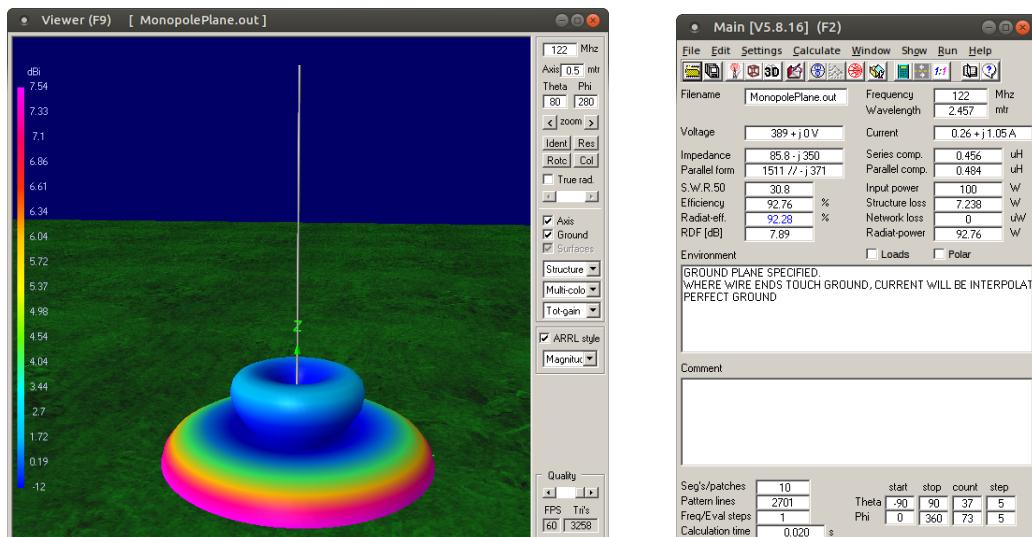


Figura 2.1: Diagrames de Radiació d'antena monopol en  $\lambda/4$  sobre un pla conductor



(a) Digrama de Radiació 3D d'antena monopol en  $\lambda/4$  sobre un pla conductor

(b) Dades de l'antena monopol en  $\lambda/4$  sobre un pla conductor

Figura 2.2

**Directivitat de l'antena:**  $D = 7.89 \text{ dB}$ .

**Impedància d'entrada:**  $Z_0 = 85.8 - j350 \Omega$ .

## 2.2.2 Sobre un cilindre metàl·lic

Per l'antena monopol comentada situada sobre un cilindre metàl·lic s'analitzen els diagrames de radiació així com la directivitat i la impedància d'entrada.

### Diagrams de Radiació

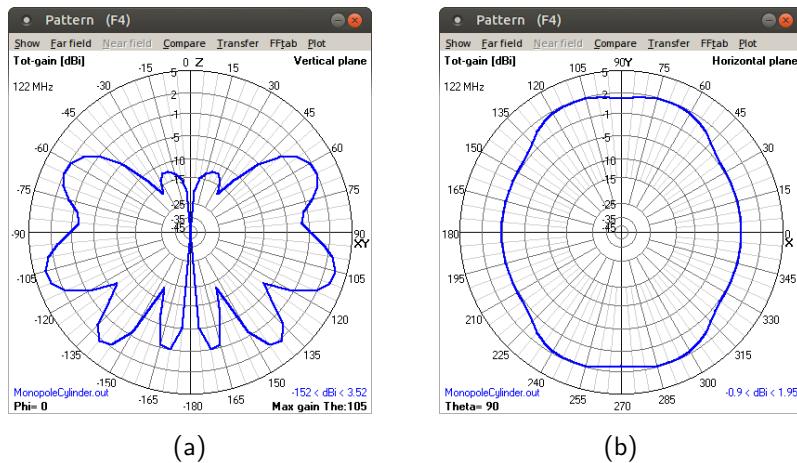
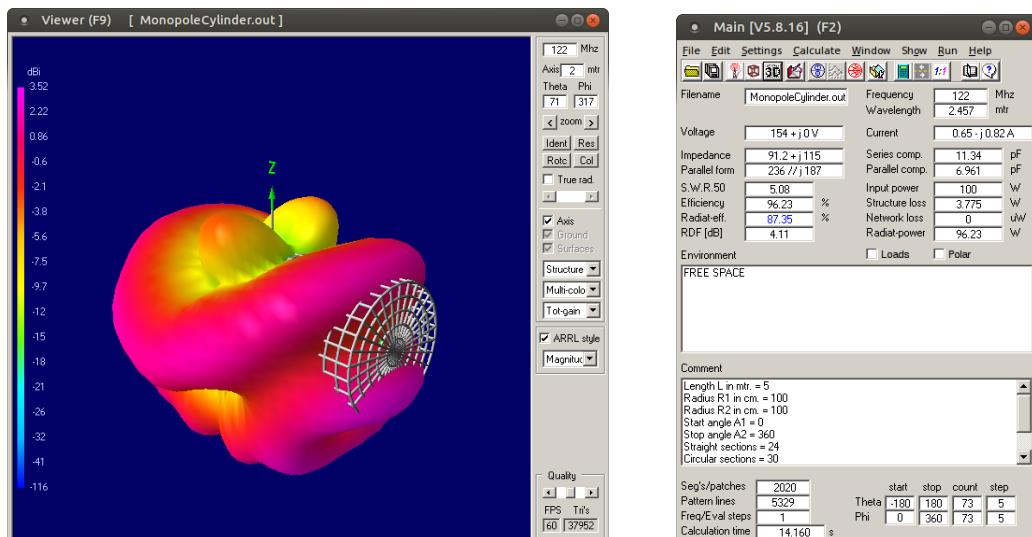


Figura 2.3: Diagrames de Radiació d'antena monopol en  $\lambda/4$  sobre un cilindre metàl·lic



(a) Digrama de Radiació 3D d'antena monopol en  $\lambda/4$  sobre un cilindre metàl·lic

(b) Dades de l'antena monopol en  $\lambda/4$  sobre un cilindre metàl·lic

Figura 2.4

**Directivitat de l'antena:**  $D = 4.11 \text{ dB}$ .

**Impedància d'entrada:**  $Z_0 = 91.2 + j 115 \Omega$ .

## 3 | Antena Escollida

Vists els ànals anteriors, a l'hora d'escollir entre una antena monopol i una dipol per a la seva construcció, s'ha escollit la segona opció, és a dir, la **construcció d'una antena dipol  $\lambda/2$** .

S'ha triat aquesta configuració doncs s'ha creut més pràctica i amb més potencial per dos motius principals:

- És més senzill aconseguir una polarització purament horitzontal amb una antena dipol que no pas amb una dipol.
- En cas de voler continuar el treball més endavant, una antena dipol ofereix una base molt bona per ampliar i construir una antena *Yagi*.

Per altra banda, una antena monopol tindrà una impedància d'entrada de  $36 \Omega$  en el millor dels casos. Per tant la desadaptació amb un cable de  $75 \Omega$  serà força gran. Inclús amb un cable de  $50 \Omega$  serà superior a la que tindria una antena dipol amb  $73 \Omega$  d'impedància amb un cable de  $75 \Omega$ .

Així doncs, per una freqüència central de treball de 122 MHz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{122 \cdot 10^6} = 2.459 \text{ m}$$

Buscant que la impedància d'entrada no tingui cap part complexa es troba la longitud d'antena L seguint el criteri de reducció del 3% explícitat a classe.

$$L = \frac{\lambda}{2} - 3\% = 1.156 \text{ m}$$

L'antena dipol que serà doncs construïda es mostra a la figura 3.1.

## Antena Escollida

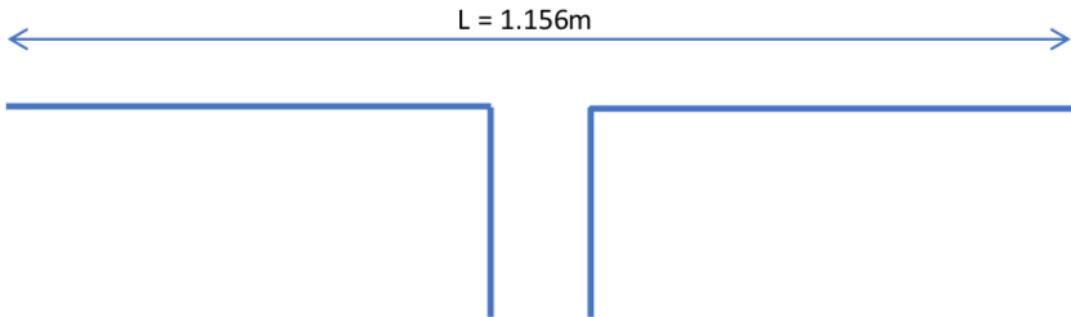


Figura 3.1: Longitud de l'antena dipol a construir

### 3.1 Resistència aerodinàmica paràsita

Abans de procedir a la construcció de l'antena, es fa un anàlisis aerodinàmic amb *CFD* per tal de determinar el drag paràsit que genera aquesta antena en l'aeronau escollida en condicions de vol.

Les condicions de vol escollides per al disseny són<sup>1</sup>:

- $v = 102.9 \text{ m/s}$
- $h = 2400 \text{ m}$
- $T = 272.6 \text{ K}$
- $P = 75625.7 \text{ Pa}$
- $\rho = 0.97$

El primer pas ha sigut modelar l'antena en *SolidWorks* amb les dimensions determinades prèviament. La malla obtinguda d'aquest model s'observa a les figures 3.1 i 3.2.

Finalment, amb ***OpenFoam*** s'han realitzat una sèrie de simulacions a partir de la malla mostrada. Així, s'han obtingut els valors mostrats a la taula 3.1<sup>2</sup>:

Cas	$C_d$
Cas de disseny	0.006
Cas d'aeronau comercial	0.005

Taula 3.1: Drag paràsit del dipol

<sup>1</sup>les variables termodinàmiques s'han obtingut amb l'alçada i emprant el model atmosfèric ISA.

<sup>2</sup>El cas d'aeronau comercial empra 8000m d'alçada i un Mach de 0.9.

## Antena Escollida

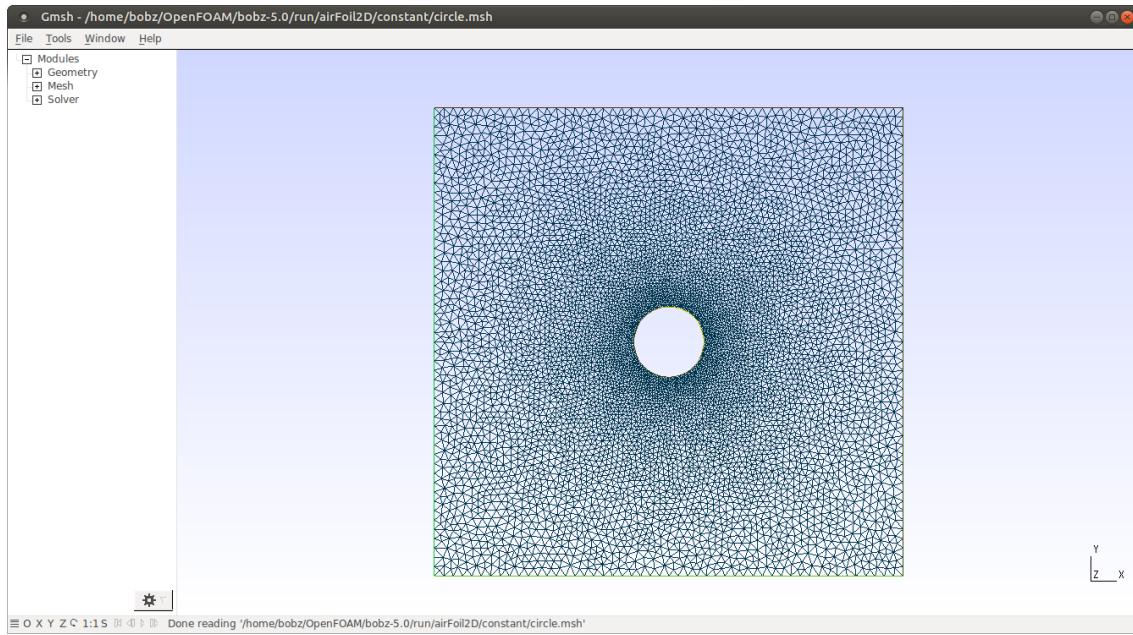


Figura 3.1: Visió Frontal malla

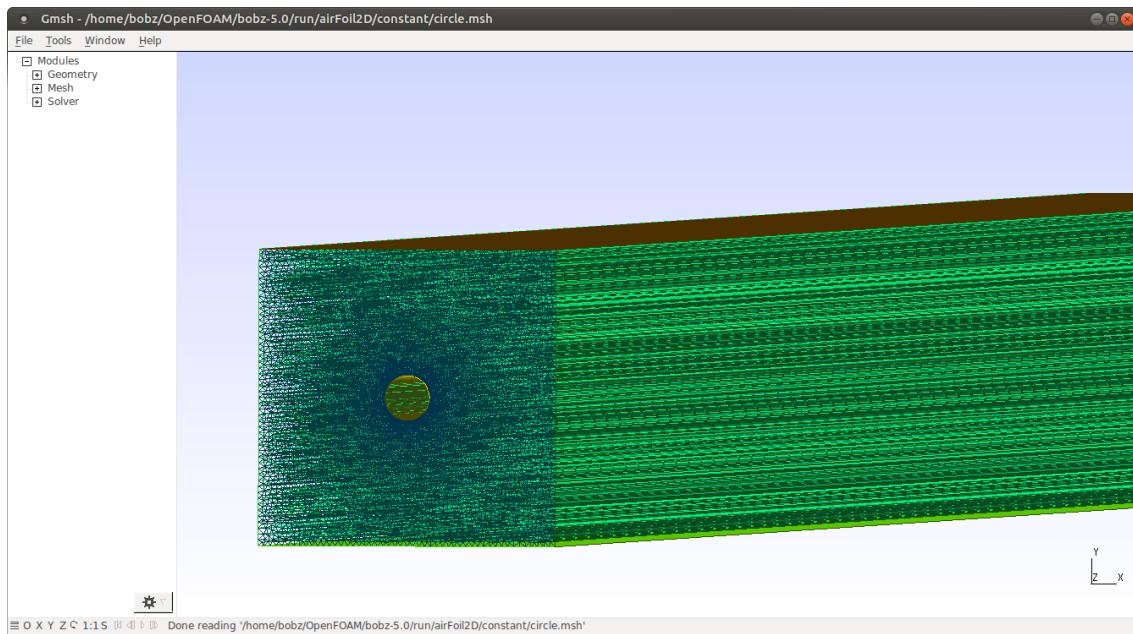


Figura 3.2: Visió de la malla en perspectiva

El forat cilíndric dins del volum de control representa l'antena, i així s'ha especificat a OpenFoam.

### 3.2 Construcció de l'Antena

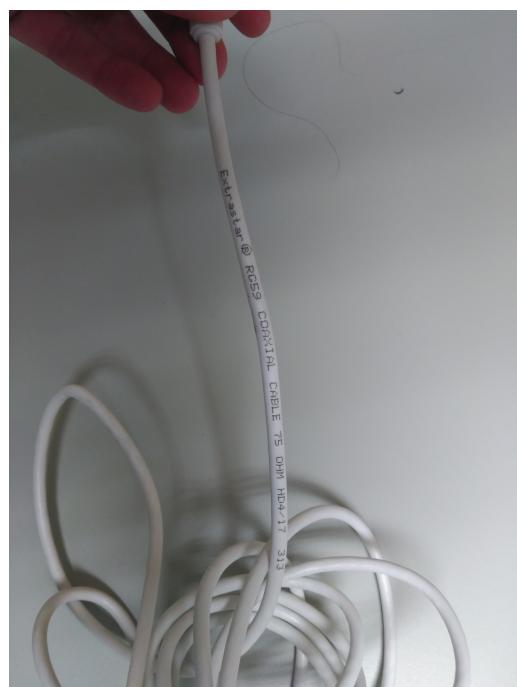
La construcció de l'antena dipol considerada consta de dues parts: el desenvolupament del balun i la construcció del cap de l'antena.

Cal mencionar que per a realitzar la construcció de l'antena, el paràmetre més important considerat ha estat que fos el més "low cost" possible sense comprometre la funcionalitat. Així doncs els materials utilitzats han estat:

- Filferro de 1.5 mm de diàmetre
- Cable coaxial RG-59 de 75 ohms
- Connector IEC
- Regleta
- Tupper
- Termocola



(a) Filferro



(b) Cable RG-59 de  $75\Omega$

Figura 3.1: Materials emprats

### 3.2.1 Balun

Com s'ha escollit un dipol, aquest és un sistema balancejat mentre que el cable coaxial és un sistema no balancejat o "*unbalanced*". Per tant, es necessitarà una peça d'adapatació entre les dues xarxes. El *balun*, com el seu nom indica, és una peça encarregada justament d'això. Aquesta era una complexitat afegida respecte al cas d'antena monopol doncs aquesta última no necessita un balun degut a que no és balancejada.

Així doncs per fabricar el balun s'ha seguit el següent model extret de [1]:

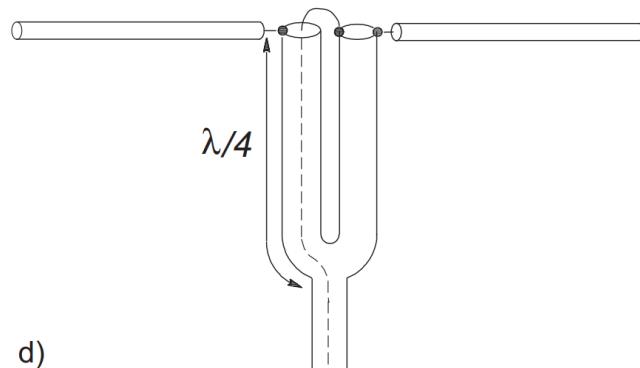
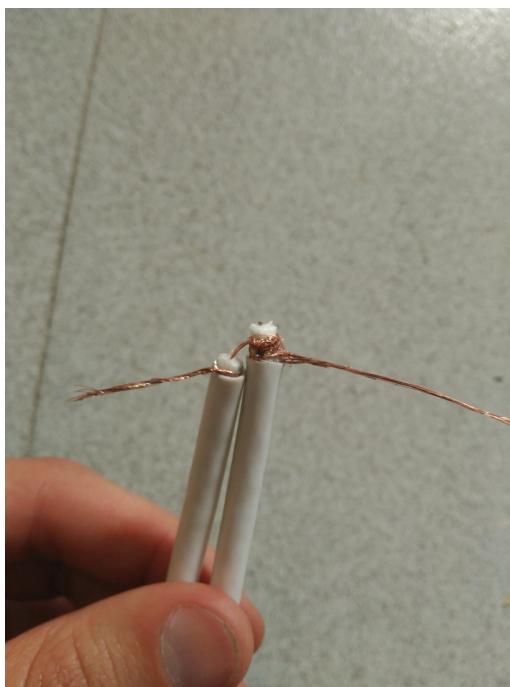


Figura 3.2: Diagrama Balun  $\lambda/4$



(a) Punta pelada



(b) Punta aïllada

Figura 3.3: Balun  $\lambda/4$  construït

## Antena Escollida

L'elecció s'ha basat en que aquesta configuració era la més senzilla que no modificava la impedància d'entrada. És recorda que el cable emprat és un RG-59 de  $75\Omega$  i que la impedància teòrica d'entrada de l'antena és de  $73\Omega$  degut a la longitud escollida. Per tant, el sistema està gairebé adaptat i no interessa que el balun modifiqui aquests valors.

S'observa el resultat del balun construït a la figura 3.3.

### 3.2.2 Cap de l'antena

Per a la construcció del cap de l'antena s'ha utilitzat filferro de 1.5 mm de diàmetre així com una regleta per connectar els dos braços al cable d'alimentació.

A més, per tal de protegir les connexions (veure figura 3.4), aquestes s'han dut a terme dins d'un *tupper* i s'han aïllat posteriorment amb termocola. A més, per temes de seguretat, a les puntes del filferro s'ha posat termocola.



Figura 3.4: Connexions realitzades

## Antena Construïda

Finalment l'antena construïda es la mostrada a la figura 3.5.



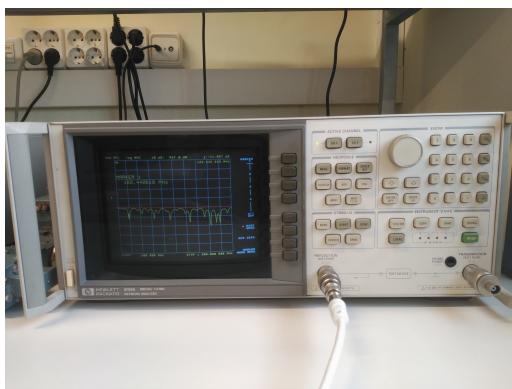
Figura 3.5: Antena dipol construïda

### 3.3 Mesures

Al laboratori es desponia dels següents aparells:

- **Network Analyzer:** HP 8752A
- **Spectrum Analyzer:** Anritsu MS2601B
- Adaptadors de cables. S'ha emprat el de tipus IEC a tipus BNC.

Així mateix, es va comptar amb el suport del professor de l'assignatura, el Dr. Antoni Barlabé, a qui agraïm la seva disposició.



(a)



(b)

Figura 3.1: Context del laboratori

### 3.3.1 Mesura del coeficient de reflexió $\Gamma$

Amb l'analitzador de xarxes vectorial connectat al conjunt antena-connectors-cable-balun, primerament es troba el coeficient de reflexió a l'entrada d'aquest. És recorda:

$$\Gamma = \frac{E_{\text{reflectida}}}{E_{\text{emesa}}} = \frac{E^-}{E^+} \quad (3.1)$$

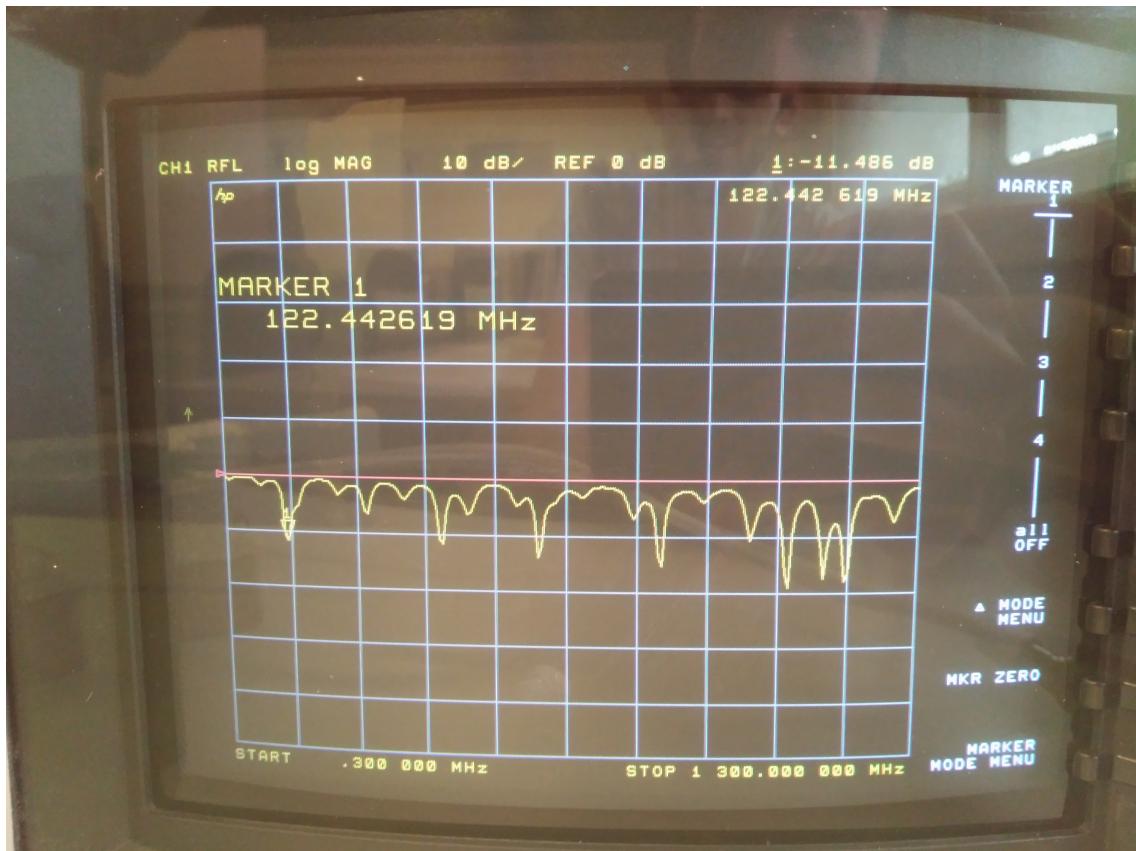


Figura 3.2:  $|\Gamma|$  pel sistema connector-cable-balun-antena. 0.3 - 300 MHz

S'observa en la figura 3.2 que hi ha molts pics inversos. En aquests pics es veu l'antena té un coeficient de reflexió baix, que és el que interessa. El primer d'aquests pics es troba sobre els 122MHz i és per al que hem dissenyat l'antena. La resta apareixen per efectes d'harmònics i altres fenòmens. A continuació, a la figura 3.3 s'amplia a la zona que interessa estudiar.

## Antena Escollida

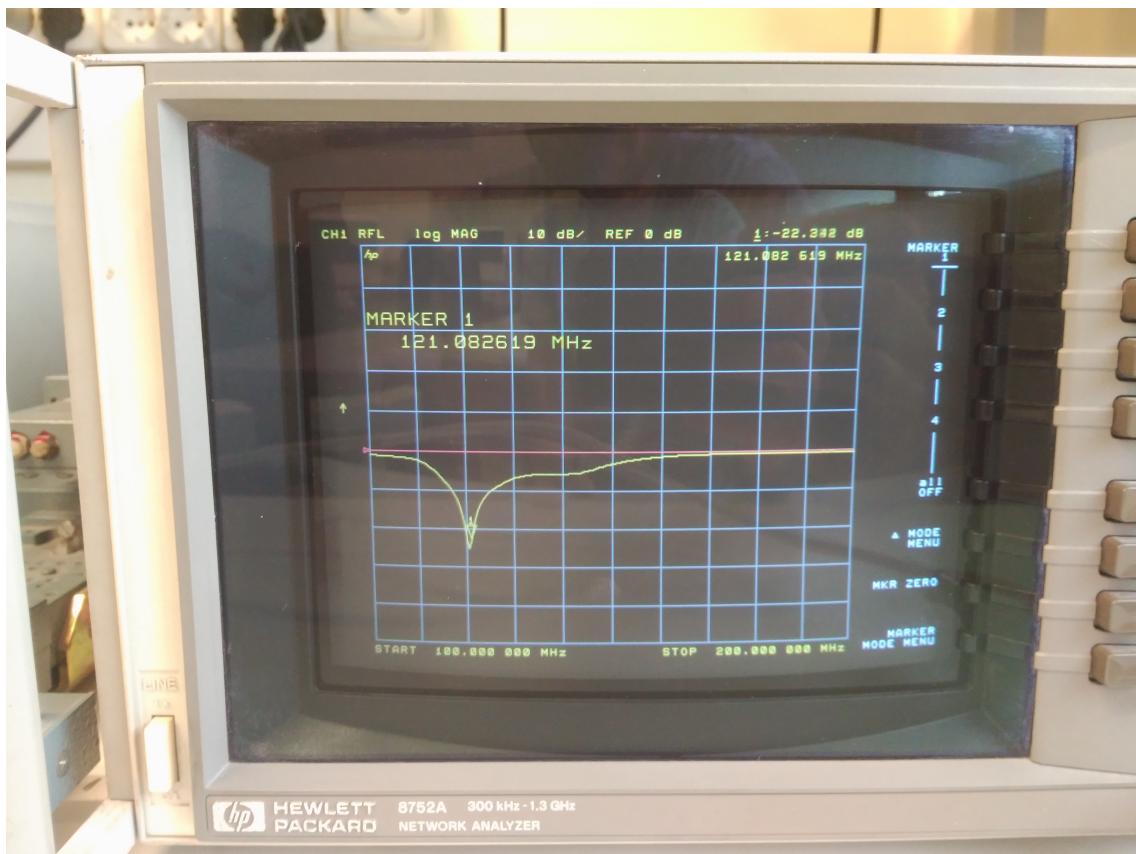


Figura 3.3:  $|\Gamma|$  pel sistema connector-cable-balun-antena. 100 - 300 MHz

D'aquí s'extreu que l'antena és òptima a 121.08MHz on presenta el següent resultat:

<u>f</u>	<u><math>\Gamma</math></u>
121.08	-20dB

Taula 3.1:  $|\Gamma|$

És considera que quan  $|\Gamma| < -10dB$  l'antena està ben adaptada.

### 3.3.2 Mesura del SWR

També amb l'analitzador de xarxes, s'obté la mesura del SWR.

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.2)$$

## Antena Escollida

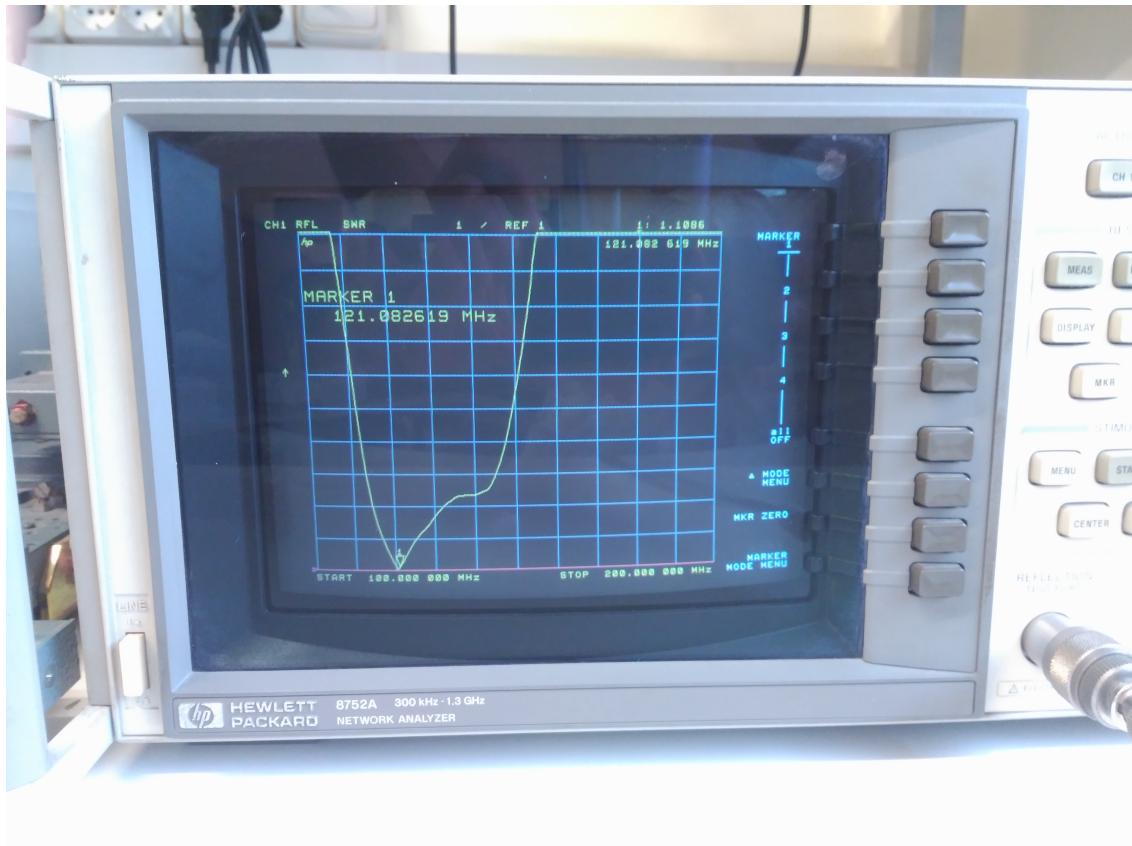


Figura 3.4: **SWR** pel sistema connector-cable-balun-antena. 100 - 200 MHz

S'obtè a la freqüència central un **SWR de 1.15**. Sempre i quan el SWR estigui per sota de 2, es considera que l'antena està ben adaptada. Sabent això s'ha mesurat el rang de freqüències operatives.

Finalment s'ha vist que l'antena opera bé entre els **117MHz i els 127MHz**. Gairebé emplena tota la banda aeronàutica. Cal comentar que al tractar-se d'una antena dipol era d'esperar que el seu ample de banda sigui més limitat.

### 3.3.3 Carta de Smith

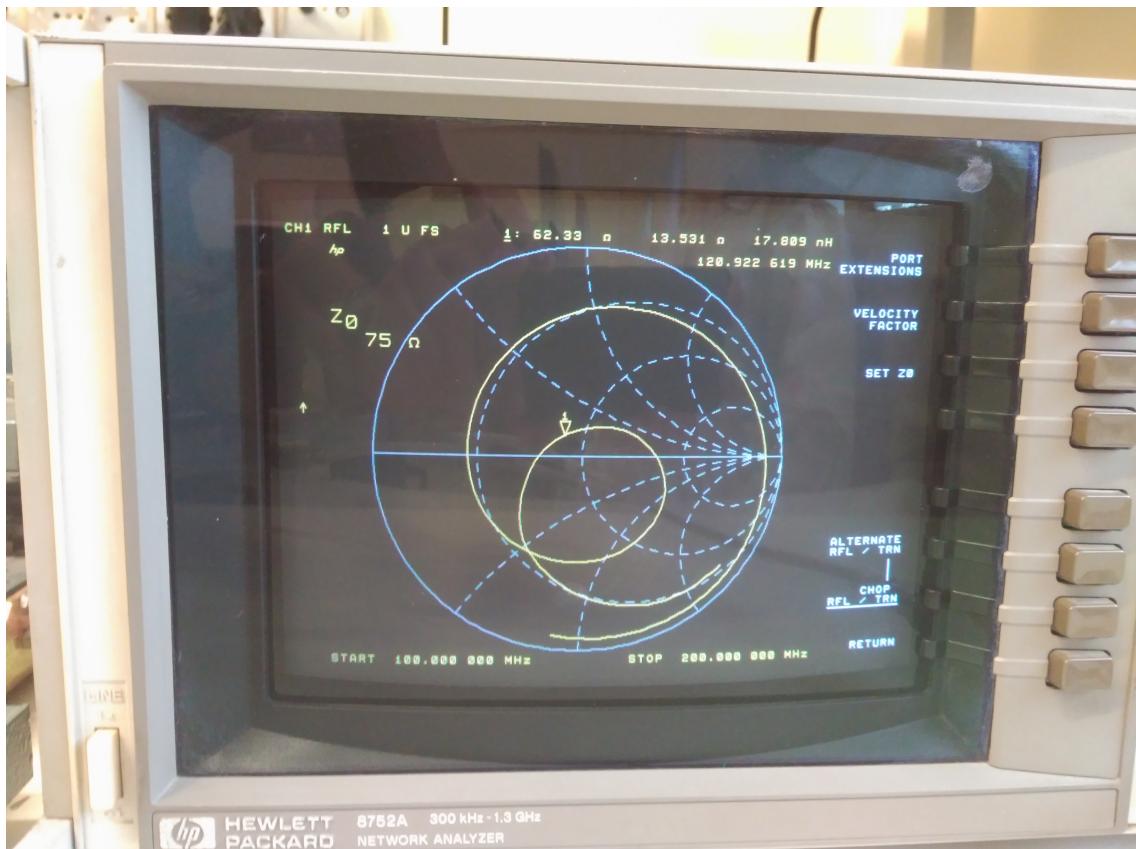


Figura 3.5: Carta de Smith

La carta de Smith també ha sigut obtinguda amb l'analitzador d'espectres configurat a  $75\Omega$ . Com es pot observar, el cursor està ben a prop del centre del cercle, ratificant així el fet que l'antena està ben adaptada. La carta ens proporciona informació extra. Resulta que la impedància d'entrada en  $\Omega$  del conjunt és:

$$Z = 62.3 + 17.8e - 9 \quad (3.3)$$

Observi's com la part imaginaria és gairebé nul·la, i com la real està molt a prop dels  $73\Omega$  teòrics calculats analíticament. S'ha de tindre en compte també que els  $73$  son únicament pel dipol, mentre que l'anterior és la de tot el sistema.

### 3.3.4 Altres

Finalment es va connectar l'antena a l'analitzador d'espectres. Amb un segon dipol situat a l'altra punta del laboratori es va emetre un to pur a la freqüència de 121MHz.

## Antena Escollida

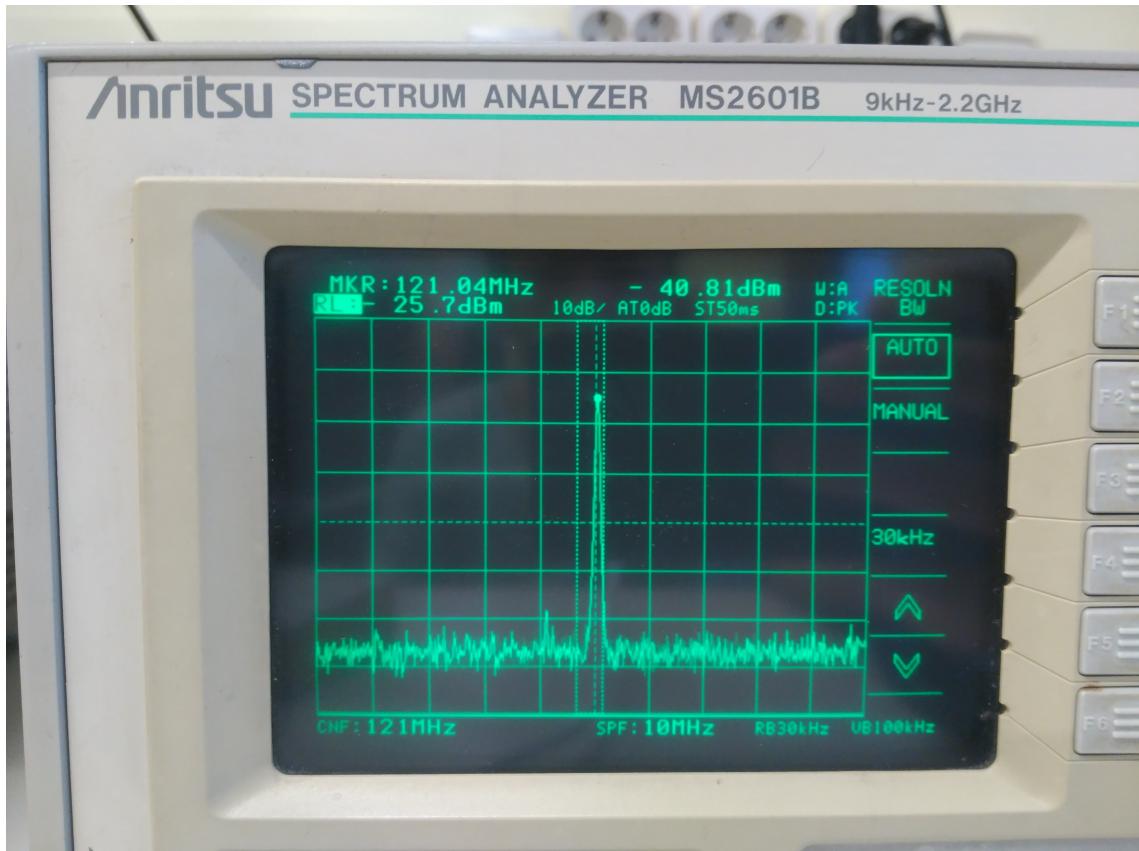


Figura 3.6: Comportament en recepció

Com es pot observar a la figura 3.6, la senyal rebuda té un molt **bon SNR**. A més, la potència rebuda, segons va comentar el professor, era força alta comparativament. Si es disposés d'una càmera anecoica, amb aquest mateix experiment es podria determinar el diagrama de radiació de l'antena i comparar-ho amb el teòric calculat del 4NEC2.

A continuació, es va sintonitzar la radio des de el mateix analitzador d'espctres i aquesta es va rebre amb bona qualitat tot i estar fora del rang "òptim".

Finalment, durant un segon experiment fet de forma autònoma (veure figura 3.7) pels integrants del grup, va ser possible escoltar a un avió aterrant a l'aeroport de Sabadell. Aquest es va fer connectant l'antena a una radio del tipus SDR que a la vegada estava connectada a l'ordinador.

## Antena Escollida



Figura 3.7: Realització experiment autònom

## 4 | Conclusions

No hi ha res millor que fer un experiment per interioritzar el millor possible conceptes que *a priori* poden semblar més abstractes. Un cop hem construït l'antena i l'hem mesurat i fins i tot provat per escoltar a la torre de control de Sabadell (LELL), ens sentim molt realitzats doncs hem vist amb els nostres propis ulls que amb pocs recursos econòmics es pot construir i fer servir una antena bàsica.

Aquest treball ens ha ajudat a trencar una barrera que podríem tindre en un primer moment degut a que al no ser especialistes en telecomunicacions, ens podria haver semblat com una tasca força llunyana i complexa.

A part, havíem vist baluns abans, però únicament per fóra, i ara hem construït el nostre propi. Això, un cop més, ha sigut revelador.

Per acabar, s'ha vist que l'antena ha estat dissenyada i construïda satisfactoriament doncs tots els paràmetres indiquen que aquesta compleix adequadament amb els requisits inicials del projecte.

## 5 | Bibliografía

- [1] Á.C. Aznar, J.R. Robert, J.M.R. Casals, L.J. Roca, S.B. Boris, and M.F. Bataller. *Antenas*. e-politecnos. Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2004.
- [2] Gobierno. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. pages 3–110.
- [3] ICAO. Anexo 10 Telecomunicaciones aeronáuticas. 2001.
- [4] International Telecommunication Union. Reglamento de Radiocomunicaciones. page 549, 2012.