Universitat Oberta de Catalunya

# Enllaç punt a punt per microones de dades multiplexades per a la transmissió de senyals de veu i Ethernet entre instal·lacions d'origen i centres d'emissors

**César Tortosa Vallejo**
E.T.T. Telemàtica

**Tutor: Antoni Morell López**

Juny 2012

# Índex

1. Introducció ..... 4
1.1 Servei Mòbil Aeronàutic (AMS) ..... 4
2. Anàlisi de necessitats ..... 5
2.1 Justificació del TFC ..... 5
2.2 Situació actual ..... 5
2.3 Solució proposada. Objectius del projecte ..... 6
2.4 Planificació del projecte ..... 7
2.5 Enfocament i metodologia ..... 7
2.6 Productes obtinguts ..... 8
3. Estudi previ de les instal·lacions existents ..... 9
3.1 Introducció ..... 9
3.2 Sistema de comunicacions de veu ..... 9
3.3 Multiplexor de primer ordre ..... 10
4. Hardware necessari per a la implementació ..... 12
4.1 Descripció dels tributaris ..... 12
4.2 Hardware i tecnologia escollits ..... 12
4.3 Associació Ethernet i canals 2 Mbps ..... 13
4.4 Configuració del hardware ..... 14
5. Tipus de modulació i freqüència a emprar ..... 16
5.1 Modulacions QPSK i 16QAM ..... 16
5.2 Justificació de l'opció escollida ..... 17
6. Disseny del sistema ..... 20
6.1 Càlcul de paràmetres ..... 20
6.1.1 Pèrdues de propagació ..... 20
6.1.2 Guany de les antenes ..... 21
6.1.3 Determinació de la potencia mínima d'emissió ..... 21
6.2 Diagrama de blocs ..... 22
6.3 Connexió amb el MUX de primer ordre ..... 23
7. Interferències amb altres sistemes en funcionament ..... 24
7.1 Metodologia de treball ..... 24
7.2 Anàlisi espectral dels senyals transmesos pels sistemes en funcionament ..... 24
7.3 Conclusió ..... 27
8. Simulació del sistema ..... 28

8.1 Metodologia i programari a utilitzar....28
8.2 Simulació de l'enllaç amb la potencia mínima calculada....28
8.3 Simulació de l'enllaç a la potencia nominal de treball....31
9. Muntatge del hardware....34
9.1 Instal·lació de les IDU....34
9.2 Instal·lació del conjunt ODU+antena....34
10. Posada en servei i configuració de l'enllaç....36
10.1 Posada en servei de l'enllaç....36
10.2 Configuració del tràfic Ethernet de l'enllaç....38
11. Impacte mediambiental del projecte....40
11.1 Càlcul de la PIRE i distancia de seguretat....40
11.2 Altres consideracions....41
12. Aspectes econòmics....42
12.1 Valoració econòmica....42
12.2 Consideracions del pressupost....43
13. Conclusions, propostes de futur i escalabilitat del sistema....44
13.1 Conclusions....44
13.2 Seguiment del cronograma....45
13.3 Propostes de futur....45
13.4 Escalabilitat del sistema....46
14. Glossari....48
15. Bibliografia....50
Annex 1. Normativa aplicable....51
1. Enllaços punt a punt. Nota UN-69....51
2. Llicència. Títol habilitant....52
Annex 2. Tecnologia PDH....53
Annex 3. Patró de radiació d'antena utilitzat a les simulacions....54
Annex 4. Model de *Longley-Rice*....55
Annex 5. Índex de figures....56
Annex 6. Índex de taules....57
Annex 7. *Datasheets* dels equipaments....58
Annex 8. Diagrama de Gantt....60

# 1. Introducció

Els serveis de comunicacions per radio desenvolupen un paper fonamental per a la prestació segura i efectiva dels serveis de navegació aèria que proporcionen les entitats certificades o autoritzades.

Dins les comunicacions aeronàutiques, s'inclouen els sistemes, les infraestructures i els procediments que fan possible l'intercanvi d'informació relacionada amb aquests serveis de navegació.

Concretament les comunicacions possibiliten, entre d'altres, el contacte permanent de les aeronaus amb les instal·lacions de terra i amb d'altres aeronaus. També permeten l'intercanvi de tot tipus d'informació entre diferents instal·lacions que presten els serveis de navegació aèria.

## 1.1 Servei Mòbil Aeronàutic (AMS)

Es pot distingir entre el servei fix aeronàutic (AFS), prestat per sistemes de comunicació entre estacions terrestres fixes i el servei mòbil aeronàutic (AMS) que s'encarrega de les comunicacions entre estacions terrestres fixes i les aeronaus. Aquest últim servei, inclou tots els medis requerits per donar suport a les comunicacions.

L'AMS fa servir canals ràdio de diferents freqüències: les bandes HF (navegació oceànica), VHF (comunicacions civils) i UHF (banda militar). El seu principal objectiu és permetre les comunicacions de veu entre les instal·lacions de terra i els pilots de les aeronaus que operen en aquell sector.

La freqüència assignada al sector, estableix un canal bidireccional que constitueix un instrument bàsic per exercir les funcions d'assessorament, vigilància i control de les aeronaus. A través d'aquest canal, les instal·lacions de terra poden donar instruccions i rebre les informacions necessàries per l'exercici de les seves funcions.

La informació transmesa en aquestes comunicacions, donada la seva naturalesa, ha de ser difosa en temps real o en un interval de temps molt curt, de manera que no pot ser processada documentalment en les publicacions oficials d'informació aeronàutica.

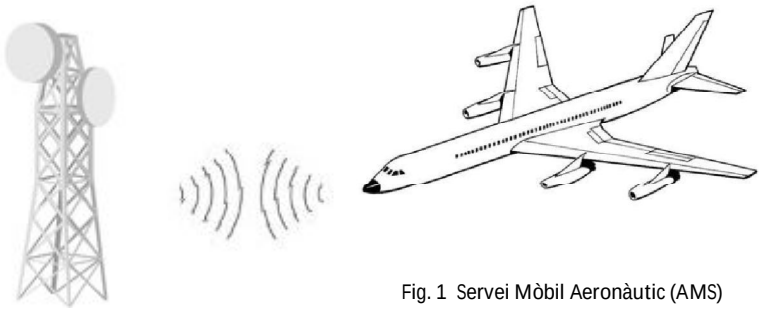


Fig. 1 Servei Mòbil Aeronàutic (AMS)

# 2. Anàlisi de necessitats

## 2.1 Justificació del TFC

Per prestar suport a l'AMS, existeixen instal·lacions a terra que s'ocupen del tractament i distribució dels senyals de veu entre els diferents sistemes de monitoratge, amplificació i radiodifusió.

Entre aquests sistemes, es troben els d'enllaç entre la instal·lació on es generen els senyals de veu i les que els transmeten. Aquest enllaç està format normalment per línies de fibra òptica i alternativament, parells de coure.

En aquest document es tracta el problema de la redundància del sistema de transmissió de senyals multiplexats de veu per fibra òptica i coure, entre una instal·lació de control i el centre d'emissors associat a la mateixa.

Per la seva naturalesa, es tracta d'un servei crític, ja que de ell depèn la correcta comunicació entre les instal·lacions de terra i les aeronaus que son a dins del seu sector, tant en vol com a les diferents instal·lacions de l'aeròdrom.

## 2.2 Situació actual

La connexió entre el centre d'emissors i la instal·lació de control està formada per dos enllaços punt a punt de fibra òptica que viatgen pel mateix cable. Per tant, hi ha una falsa redundància ja que el tall físic d'un sol cable anul·la la connexió redundant d'aquest medi.

Les dades transmeses son trames de 2Mbit/s compostes per senyals multiplexats en el temps, conformant un stream que s'envia via fibra òptica modulat amb HDB3. Posteriorment, aquests senyals son demultiplexats i encaminats als corresponents transmissors de VHF i UHF.

L'alternativa a l'enllaç de fibra òptica, és un enllaç punt a punt de coure que viatja físicament pel mateix banc de tubs i per tant, està exposat als mateixos danys mecànics (o de qualsevol altre mena) que la connexió per fibra.

Tot i que existeixen altres alternatives a la comunicació com poden ser els transceptors d'últim recurs radio i un sistema de transmissió des de la pròpia instal·lació de control, la operativa normal és establir sempre les transmissions via centre d'emissors i fer la recepció des de la instal·lació de control.

Per un altra banda, existeix una connexió de xarxa local via interfície codireccional de 64Kbps, que transmet dades destinades a la monitorització remota del programari de control dels transmissors. Aquesta interfície, tot i funcionar correctament, supera el límit de distància màxima donada pel fabricant.

## 2.3 Solució proposada. Objectius del projecte

Aquest projecte te com a objectiu obtenir una connexió que no comparteixi medi amb les connexions existents entre la instal·lació de control i el centre d'emissors. Això es farà mitjançant una connexió punt a punt per microones en configuració redundant 1+1 HSB[1], en la banda de 18GHz.

L'enllaç via radio haurà de transmetre, junt amb les dades de veu, la informació que viatja per la connexió de xarxa local, de manera que els dos extrems comptin amb una connexió redundant en cas de fallada de l'únic camí existent.

D'aquesta manera i aprofitant una part de les infraestructures existents, es pretén integrar en un sol sistema de transmissió per microones, dos tributaris diferents: una trama E1[2] de 2048Kbps i una connexió Ethernet 100 Base T.

També es objectiu d'aquest projecte obtenir un sistema escalable que permeti la interconnexió entre diferents instal·lacions locals, per donar redundància a connexions de monitorització i telecomandament de sistemes actius ja existents, que actualment s'estableixen via mòdem.

A continuació es mostra un mapa amb la localització dels emplaçaments de control i centre d'emissors, així com la trajectòria del radioenllaç.

Fig. 2 Topografia de l'enllaç

[1] HSB. *Hot StandBy*. Configuració en reserva activa: un sistema està preparat per entrar en funcionament de manera immediata, en cas de fallada de l'altre sistema.

[2] Per més informació sobre la trama E1, veure l'annex 2.

## 2.4 Planificació del projecte

El projecte es divideix en quatre parts[3].

1. Introducció, justificació i objectius del projecte.

   La primera part comprèn una breu introducció al sector aeronàutic en el que es circumscriu el projecte. A continuació es farà una exposició de la situació actual de les instal·lacions i es farà un anàlisi de les necessitats, per posteriorment proposar una solució adequada: els objectius del projecte.

2. Anàlisi de les instal·lacions existents, disseny del sistema i càlculs necessaris.

   En aquesta part es farà una introducció al funcionament del hardware ja instal·lat així com les possibilitats de connexió amb el radioenllaç. També es farà un càlcul de les potencies d'emissió necessàries i un breu estudi del tipus de modulació a emprar, així com de les possibles interferències amb d'altres sistemes en funcionament.

3. Simulació, muntatge i posada en servei de la instal·lació.

   Es farà la simulació del sistema mitjançant el software adequat, un anàlisi de la seguretat del sistema i es tractaran els aspectes econòmics i l'impacte mediambiental del projecte. Si es pot dur a terme la implementació física, es documentarà el procés de muntatge i posada en servei.

4. Lliurament del projecte.

   Aquesta darrera tasca comprèn la redacció final de la memòria del projecte i l'elaboració de la presentació. Tot i que és la darrera, és una tasca que, cronològicament, està uniformement distribuïda en tota la durada del projecte i inclou la redacció de la memòria i el material audiovisual complementari.

## 2.5 Enfocament i metodologia

Per qüestions de confidencialitat, no es podran donar detalls dels emplaçaments (geogràfics, constructius, etc.) ni de les configuracions, instal·lacions i muntatges existents. Tampoc es podrà donar informació explícita d'altres sistemes que ja estan en funcionament, com pot ser la seva funcionalitat o les freqüències nominals de treball.

Per tant, tots aquells paràmetres que puguin ser considerats confidencials, com coordenades geogràfiques, freqüències d'emissió, etc. apareixeran convenientment pixel·lats per garantir-ne el secret. Així mateix, l'estudi d'interferències inclourà unes freqüències aproximades però no reals.

[3] A l'annex 8 es proporciona un diagrama de Gantt amb la temporització de les tasques.

Quant a la metodologia de treball, s'imposarà una política d'aprofitament de les instal·lacions ja existents, per tal de dotar al sistema de comunicacions actual d'una alternativa sense fils. Això suposarà seguir el cronograma establert al diagrama de Gantt de l'annex 8.

## 2.6 Productes obtinguts

A la conclusió d'aquest TFC, s'haurà dut a terme el disseny, muntatge i simulació de posada en funcionament d'una infraestructura de transmissió d'informació i senyals de veu per microones, capaç d'interconnectar dues instal·lacions amb un alt grau de disponibilitat i fiabilitat.

Aquesta infraestructura estarà formada per un radioenllaç entre dos punts situats un de l'altre a una distancia de 845 metres [4] i els elements o sistemes addicionals, necessaris pel seu funcionament. Cada instal·lació comptarà amb el següent equipament:

- IDU [5] en configuració 1+1 HSB
- ODU [6] principal
- ODU auxiliar
- Antena + acoblador asimètric
- Equip informàtic de supervisió i configuració
- Cablejat de connexió amb els sistemes existents

[4] La distancia real exacta pot diferir en funció de la localització de les antenes. Aquesta es decidirà en el moment de fer el muntatge, depenent de l'espai lliure disponible en les torres de comunicacions. No obstant, el marge de variació no excedirà de 15 metres i per tant no té efectes pràctics quant a càlculs d'esvaïment del senyal del radioenllaç.

[5] IDU. *InDoor Unit* (unitat interior)

[6] ODU. *OutDoor Unit* (unitat exterior)

# 3. Estudi previ de les instal·lacions existents

## 3.1 Introducció

A continuació es farà una breu introducció de les instal·lacions existents, els seus principis de funcionament i la seva configuració bàsica. Es mostrarà un diagrama de blocs general de cada sistema i les seves capacitats/possibilitats d'interconnexió amb altres sistemes.

Els subsistemes involucrats en el processament i transmissió de la informació tractada son bàsicament tres: el sistema de comunicacions de veu, el sistema de multiplexació i el sistema de transmissió de dades.

D'aquest tres sistemes s'analitzaran només els dos primers, ja que el subsistema de transmissió actual (FO i coure) no és rellevant per l'abast d'aquest projecte.

## 3.2 Sistema de comunicacions de veu

El sistema de comunicacions de veu existent, permet i facilita les comunicacions entre aeronaus i centres de control i està format per tres subsistemes:

Subsistema de comunicacions radio terra/aire.

Subsistema de comunicacions telefòniques terra/terra.

Subsistema de configuració, supervisió i manteniment.

El subsistema de comunicacions radio terra/aire és l'encarregat de fer les operacions de commutació necessàries per tal que els operadors accedeixin als recursos de comunicació que controlen. Està format, entre d'altres, pels següents elements:

1. Targeta que ofereix serveis d'enllaç de veu i dades de manera indiferent entre el bastidor central i la posició d'operador, així com els punts de transformació A/D i D/A. Es compon bàsicament d'un processador MC68302, un DSP [7] i diversos circuits d'entrada i sortida d'àudio analògic.
2. Targeta d'operador i interfícies que permet l'accés al sistema dels ordinadors dedicats a la configuració, manteniment i supervisió del sistema. També basa el seu funcionament en un processador MC683020.
3. Unitat per interfícies d'àudio analògic B4T a quatre fils per donar suport a canals radio i en general a qualsevol interfície analògica de 4 fils amb senyalització en banda o fora de banda (E&M). El senyal provinent de quatre targetes B4T s'associa a una targeta mestra ED4 que es la responsable de digitalitzar l'àudio i la senyalització (E&M) dels recursos associats.

[7] DSP. *Digital Signal Processor* (processador de senyal digital)

Vegem a continuació un diagrama de blocs del sistema:

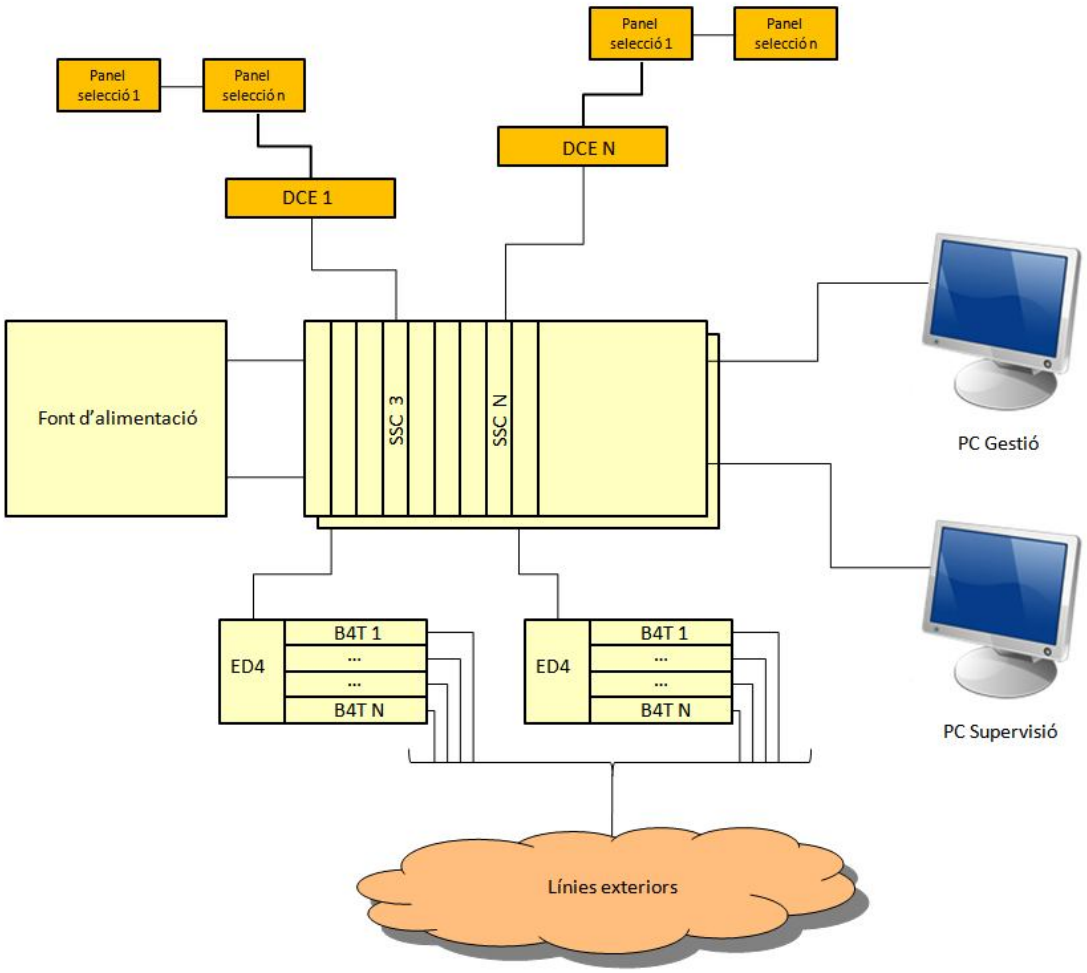



Fig.3 Esquema del sistema de comunicacions de veu

## 3.3 Multiplexor de primer ordre

El sistema de comunicacions de veu enllaça amb un multiplexor de primer ordre PCM [8] que permet conjuminar 30 canals de veu i/o dades en una interfície digital de 2Mbps, fent servir multiplexació en temps. Per tant, la funció del MUX [9] es la d'enviar i rebre a través d'un canal dúplex, 32 canals bàsics d'informació.

L'equip es comunica amb altres sistemes per dos camins físics opcionals. El primer, a través de cable coaxial complint la recomanació G-703 de la ITU-T en interfície física i

[8] PCM. *Pulse Code Modulation*. Procediment de modulació que transforma un senyal analògic en una seqüència de bits.

[9] MUX. Multiplexor.

elèctrica per 2048Kbps. El segon, que no està implementat, és a través de fibra òptica mitjançant una targeta opcional.

Aquestes dues interfícies son el nivell físic de comunicació del processador de trama, encarregat de processar la informació continguda a la trama de 2Mbps que compta amb 32 "ranures" de temps d'accés a trama (time-slot access).

Les targetes de dades incorporen una interfície codireccional de 2Mbps segons la recomanació G-703 del CCITT[10] combinant els 30 canals de veu/dades, un de senyalització i un altre de sincronisme (30+1+1 canals) ajustant la trama i multitrama a la recomanació G-732 del CCITT.

La trama formada per 32 canals de 64 Kbps multiplexats forma una trama E1[11]. La sortida d'aquest MUX ataca l'entrada d'un altre MUX de 4 canals que genera una trama E2[12] a 8448Kbps±30ppm. Aquesta trama E2 es la que es transmet per fibra òptica a l'altre extrem del sistema.

Es mostra a continuació un diagrama de blocs del MUX.

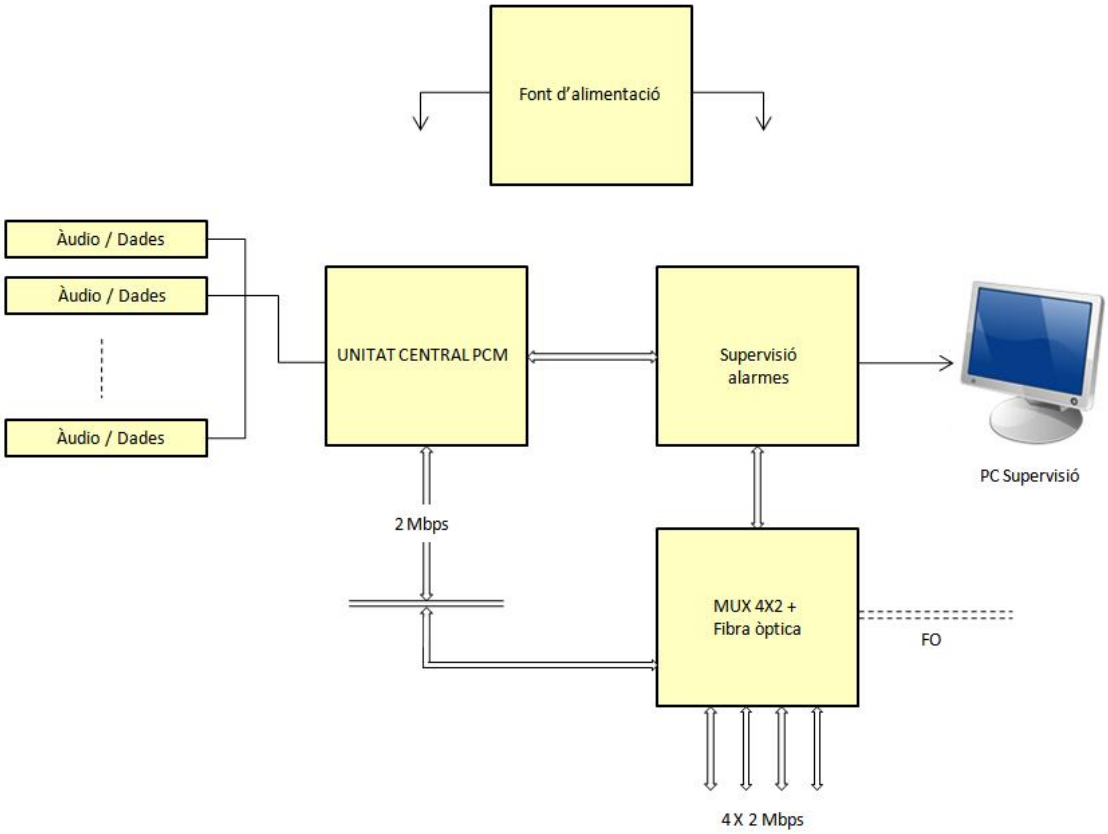



Fig.4 diagrama de blocs del multiplexor de primer ordre

[10] CCITT. Comitè Consultiu Internacional Telegràfic i Telefònic, en l'actualitat ITU-T

[11] Veure l'annex 2 sobre la tecnologia PDH.

[12] E2. Trama resultant de multiplexar quatre trames E1. Per a més informació, veure l'annex 2 sobre la tecnologia PDH.

# 4. Hardware necessari per a la implementació

## 4.1 Descripció dels tributaris

Per una banda, hi ha una trama E1 estructurada segons la recomanació G-732 del CCITT provinent del sistema de comunicacions de veu. Aquesta trama és el senyal de sortida del MUX de primer ordre, que a la instal·lació actual actua de tributari del MUX de segon ordre (actualment és l'únic tributari d'un sistema sobredimensionat amb vista a futures ampliacions) que connecta per fibra òptica amb la destinació.

Per un altra banda, s'ha de transmetre el senyal Ethernet 100Base-T que prové de dues xarxes LAN als dos extrems de l'enllaç. Aquestes xarxes estan formades per equips informàtics destinats a la monitorització, manteniment, comandament i control del hardware associat a les instal·lacions.

Per tant, caldrà utilitzar hardware que ofereixi la possibilitat de transmetre simultàniament un senyal Ethernet amb canals de 2Mbps (trama E1).

## 4.2 Hardware i tecnologia escollits

El mercat ofereix una amplia oferta d'equips que poden satisfer les necessitats descrites anteriorment. S'ha escollit un radioenllaç del fabricant Sagem [13] amb tecnologia PDH [14] en configuració 1+1 (HSB) que permet treballar en dos modes diferents:

- Tributaris de 2Mbps: 2X fins a 16X2Mbps per software.
- Tributaris de 2Mbps + Ethernet 100Base-T: 2X fins a 16X2Mbps + 100Base-T per software.

Per aquest projecte s'adoptarà la opció de nxE1+ Ethernet 100Base-T, (entenent nXE1 com un nombre indeterminat de tributaris de 2Mbps) de manera que es disposa de les següents entrades:

1. **Ports Ethernet.** Hi ha disponibles quatre ports Ethernet: tres s'assignen per a l'administració de la xarxa i el quart s'utilitza quan es connecta un tributari Ethernet 100Base-T. Els ports "*Manager*", "*East*" i "*West*", formen part d'un concentrador intern que poden interconnectar l'equip amb altres IDU o bé a un administrador SNMP[15].

[13] Per més informació es pot consultar l'annex 7 de característiques tècniques dels equips.

[14] PDH. Veure l'annex 2.

[15] SNMP. *Single Network Management Protocol*.

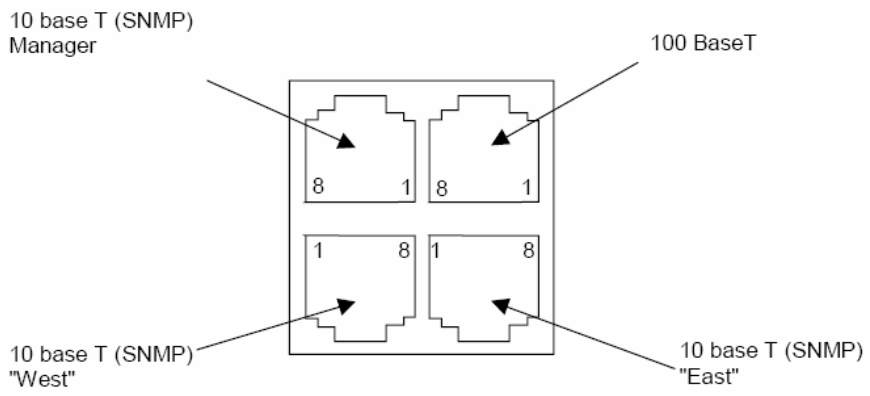



Fig.5 Ports Ethernet de la IDU

2. **Canals de 2Mbps.** Hi ha quatre connectors SubD25 que agrupen els 16 canals de 2Mbps, amb quatre canals per cada connector. Aquests accessos son disponibles en mode 120Ω simètric i en mode 75Ω coaxial, fent l'elecció a través del software de control del fabricant.

   Es mostra a continuació la versió amb port Ethernet 100Base-T, que depenent de la configuració de canal i modulació escollida (concretament si hi ha o no tributari Ethernet) limita el nombre de tributaris a 8, més 1 canal suplementari disponible al connector *Extra Trib*.

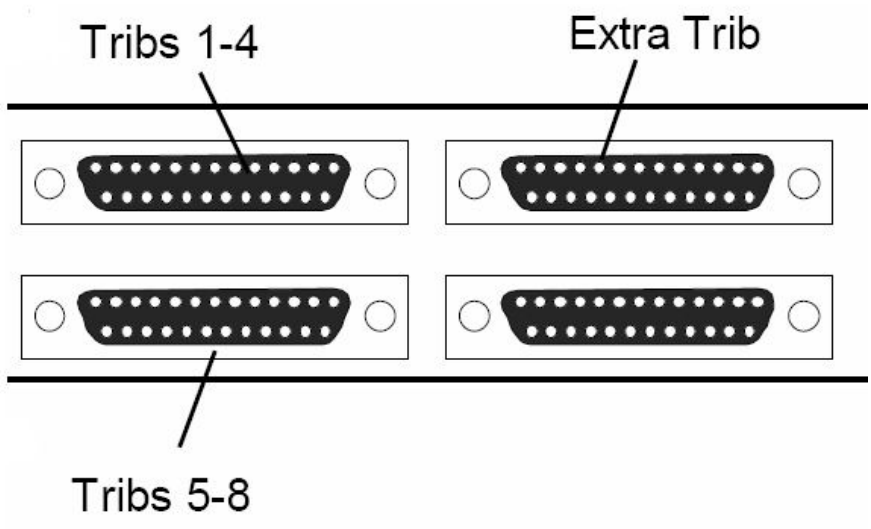



Fig.6 Canals de 2Mbps de la IDU

## 4.3 Associació Ethernet i canals 2 Mbps

Aquesta configuració permet transmetre de forma simultània un senyal Ethernet i diversos canals de 2Mbps. Per evitar les sobrecàrregues, es configurarà l'enllaç en

mode bridge[16] i s'efectuarà un aprenentatge automàtic de les adreces MAC dels dispositius situats a un mateix segment LAN. Aquesta configuració es detallarà quan es dugui a terme el muntatge físic.

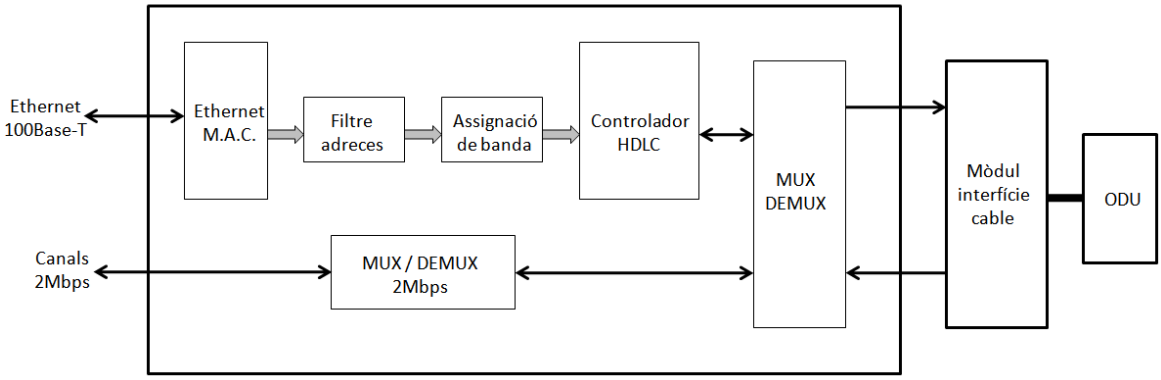



Fig.7 Diagrama de blocs de la IDU amb Ethernet + 2Mbps

## 4.4 Configuració del hardware

Pel funcionament del conjunt, s'escollirà una configuració 1+1 isofreqüència (*Hot Standby*, HSB). El funcionament d'aquesta configuració es basa en els següents principis:

- Les dues ODU (principal i auxiliar) funcionen a la mateixa freqüència i es connecten a una sola antena mitjançant un acoblador[17] passiu amb un acoblament que es pot fixar en 3dB, 6dB o 10dB.
- Quan un transmissor és operatiu, l'altre està en posició *mute*, amb alimentació però amb la potencia tallada.
- Els dos receptors estan operacionals i la commutació en transmissió és independent de la de recepció i viceversa.
- La commutació en transmissió o recepció només depèn de les informacions del terminal local, de manera que el terminal remot no controla la commutació del terminal local.
- Es possible forçar la commutació manual a traves del software de control.

[16] El mode bridge permet unir dues LAN Ethernet via ràdio. En aquest mode el sistema compleix amb l'estàndard ANSI/EEE 802.1D i es capaç d'aprendre automàticament les adreces MAC dels sistemes connectats a ambdós extrems del pont.

[17] Dispositiu que permet utilitzar dues ODU amb una sola antena fent l'acoblament del senyal d'RF entre els tres dispositius.

Així, cada terminal radio es composa de:

- Una IDU amb dos mòduls d'interfície de cable (ICM).
- Dues ODU connectades per cables coaxials independents a les ICM.
- Un acoblador passiu de RF.
- Una antena.

A continuació es mostra un diagrama de blocs amb la configuració 1+1 HSB.

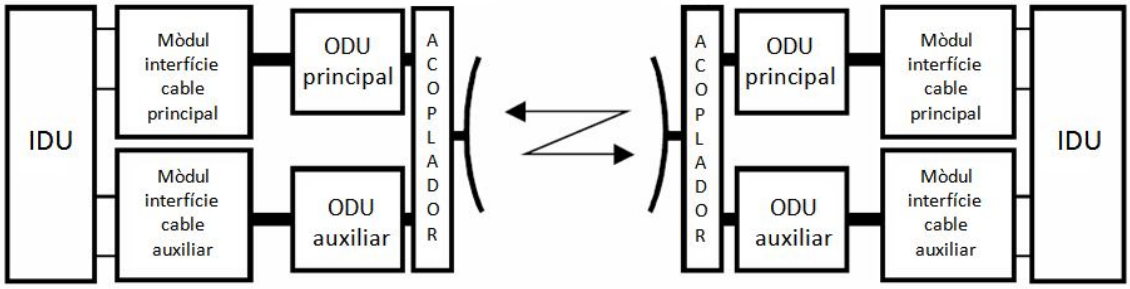



Fig.8 Configuració 1+1 HSB

o bé un esquema més pràctic

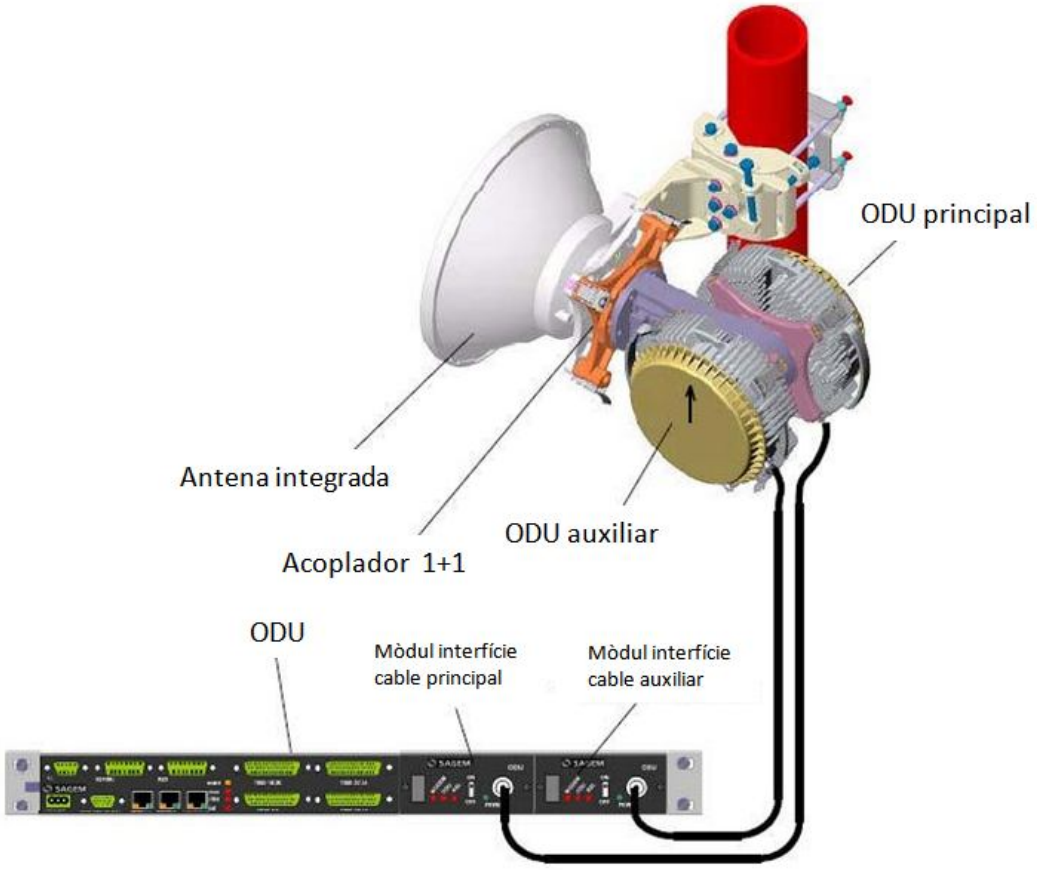


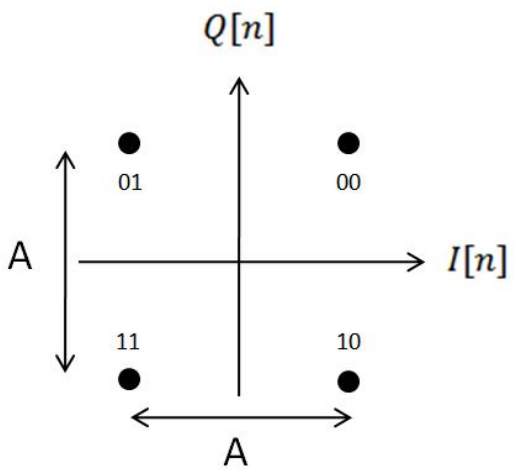

Fig.8 bis. Configuració pràctica 1+1 HSB

# 5. Tipus de modulació i freqüència a emprar

## 5.1 Modulacions QPSK i 16QAM

El hardware escollit suporta dos tipus de modulació, QPSK i 16QAM. A continuació es farà una breu exposició de les característiques d'ambdues modulacions i es justificarà l'elecció feta.

**QPSK.** Per aquesta modulació s'assignen 2 bits per símbol (4 símbols disponibles) de manera que el primer bit determina el signe del component en fase $I[n]$ i el segon el del component en quadratura $Q[n]$. Veiem a continuació la constel·lació i la codificació de símbol:




| Bits $b[2n]$ $b[2n+1]$ | $I[n]$ | $Q[n]$ |
|---|---|---|
| **00** | $\frac{A}{2}$ | $\frac{A}{2}$ |
| **01** | $-\frac{A}{2}$ | $\frac{A}{2}$ |
| **11** | $-\frac{A}{2}$ | $-\frac{A}{2}$ |
| **10** | $\frac{A}{2}$ | $-\frac{A}{2}$ |

Fig.9 Constel·lació i codificació de símbol de la modulació QPSK

Segons es pot veure a la taula anterior, tots els símbols tenen la mateixa amplitud, de manera que la transició entre símbols només implica un canvi de fase del senyal modulat $\varphi_m$ expressat com:

$$\varphi_m = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{-3\pi}{4}, \frac{-\pi}{4}$$

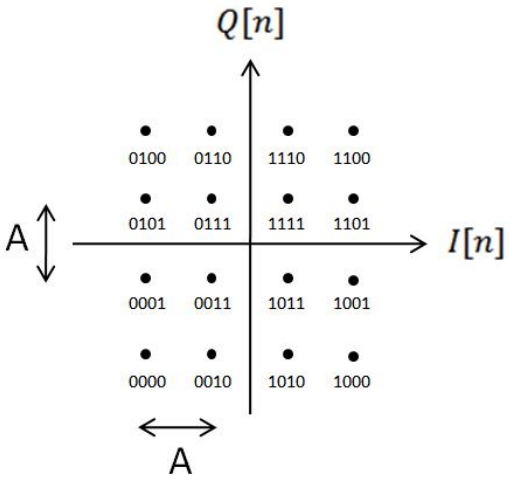
L'energia mitjana de símbol i de bit d'aquesta modulació s'extreu de l'expressió general de l'energia mitjana de símbol i bit les modulacions QAM, de manera que per QPSK serà

$$E_b = \frac{{A_c}^2}{2b}\left({\sigma_I}^2 + {\sigma_Q}^2\right) = \frac{{A_c}^2 \cdot A^2}{8}$$

amb una BER de

$$P_b \cong Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

**16QAM.** En aquesta modulació s'assignen 4 bits per símbol –per tant hi ha 16 símbols disponibles– de manera que al codificar els símbols del component en fase i en quadratura a partir de dos bits, s'obtenen els quatre nivells possibles en una modulació 4PAM polar. Veiem a continuació la seva constel·lació i la codificació de símbol:




| Bits $b[4n]$ $b[4n+2]$ | $I[n]$ | Bits $b[4n+1]$ $b[4n+3]$ | $Q[n]$ |
|---|---|---|---|
| **00** | $-\frac{3A}{2}$ | **00** | $\frac{A}{2}$ |
| **01** | $-\frac{A}{2}$ | **01** | $\frac{A}{2}$ |
| **11** | $\frac{A}{2}$ | **11** | $-\frac{A}{2}$ |
| **10** | $\frac{3A}{2}$ | **10** | $-\frac{A}{2}$ |

Fig.10 Constel·lació i codificació de símbol de la modulació 16QAM

L'energia mitjana de símbol i de bit de la modulació 16QAM també s'obté de l'expressió general de l'energia mitjana de símbol i bit les modulacions QAM, calculant prèviament les variàncies corresponents a les amplituds de símbol de manera que

$$E_b = \frac{{A_c}^2}{2b}\left({\sigma_I}^2 + {\sigma_Q}^2\right) = \frac{5{A_c}^2 \cdot A^2}{16}$$

amb una probabilitat d'error per bit de

$$P_b \cong \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{4}{5}\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

## 5.2 Justificació de l'opció escollida

Per tal d'escollir la modulació a emprar, es tindran en compte els següents criteris d'elecció:

- S'ha de garantir la fiabilitat de la transmissió
- La velocitat de transmissió de les dades no és crítica
- Es vol obtenir una baixa taxa d'error de bit

- La modulació ha de ser robusta i fiable (MER[18] alta)

Les mesures de camp[19] donen una potencia rebuda de $-62.5dBm$ per un soroll del canal en el pitjor cas de $-78dBm$. Es pot calcular la $BER$ en funció del canal per les dues modulacions, de manera que suposant polsos on $B = 1/T_S$

$$SNR = -62.5dB - (-78dB) = 15.5dB$$

llavors

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{QPSK_{dB}} = \frac{SNR}{\log_2(\mathrm{M})} = \frac{15.5dB}{\log_2(4)} = 7.75dB$$

i per 16QAM tenim els següents valors

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{16QAM_{dB}} = \frac{SNR}{\log_2(\mathrm{M})} = \frac{15.5dB}{\log_2(16)} = 3{,}875dB$$

Si ara es calcula la BER en funció de $\gamma_b = E_b/N_0$ es tindrà que

$$BER_{QPSK} \approx Q\left(\sqrt{2\cdot\gamma_b}\right) = Q\left(\sqrt{2\cdot 7{,}75}\right) = 4{,}127\cdot 10^{-5}$$

$$BER_{16QAM} \approx \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{\gamma_b\cdot\frac{4}{5}}\right) = \frac{3}{4}Q\left(\sqrt{3{,}875\cdot\frac{4}{5}}\right) = 2{,}93\cdot 10^{-2}$$

La BER[20] calculada per QPSK a la potencia de transmissió establerta està molt per sota dels requeriments necessaris per una correcta recepció de les dades. En canvi, la BER obtinguda per 16QAM supera els valors donats pel fabricant, que estableix un llindar de recepció garantit per 16QAM de $-75.5dBm$ amb una BER $< 10^{-3}$.

[18] *MER. Modulation Error Rate*. És una valoració qualitativa que permet determinar com és de bo un senyal modulat digitalment. Es calcula com $MER_{dB} = 10\cdot log_{10}(P_{senyal}/P_{error})$ on $P_{senyal}$ és la potencia del senyal transmès ideal i $P_{error}$ és la potencia RMS del vector error. Aquest és un vector en el pla I-Q entre el punt ideal de la constel·lació corresponent a un símbol i el punt real on s'ha rebut al desmodular.

[19] Veure capítol 8, simulació del sistema.

[20] BER. *Bit Error Rate*. Nombre de bits erronis respecte del total de bits rebuts en un interval determinat de temps.

Per tant, tot i que es rebrà correctament el senyal a l'altre extrem de l'enllaç perquè el nivell de recepció es superior a la sensibilitat del hardware, no es compleixen els criteris de BER degut als nivells de soroll mesurats ($-78dBm$).

En conseqüència, serà necessari escollir una modulació amb menys nivells i símbols per garantir, en la mesura del possible, la qualitat de l'enllaç.

A continuació es mostra una gràfica generada amb Matlab/Octave, amb la taxa d'error de bit en funció del quocient d'energies $E_b/N_0$ per diferents tipus de modulació, entre les que es troben *QPSK* i *16QAM*.

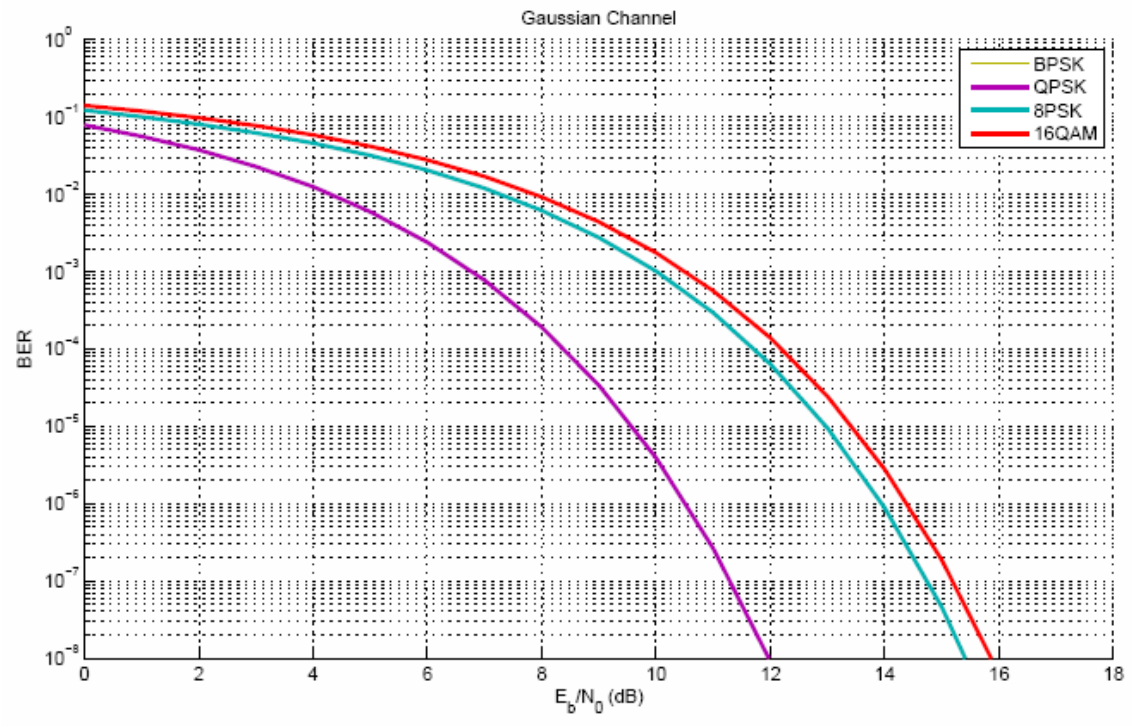



Fig.11 Quocient d'energies $E_b/N_0$ de diferents modulacions generats amb Matlab/Octave.

# 6. Disseny del sistema

## 6.1 Càlcul de paràmetres

### 6.1.1 Pèrdues de propagació

Per calcular les pèrdues de propagació, s'aplicarà el model de propagació sobre espai lliure, que considera que la potència rebuda $P_R$ depèn de la potencia transmesa $P_T$, dels guanys del transmissor $G_T$ i receptor $G_R$, de la distancia $d$ i de la longitud d'ona del senyal $\lambda = c/f$.

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d}\right)^2$$

Si es dedueix l'expressió de les pèrdues de la fórmula de la propagació en espai lliure, i es té en compte que la distancia real entre les dues antenes és d'uns 845m, es pot calcular l'atenuació total que hi haurà per pèrdues en espai lliure de la següent manera:

$$Pèrdues_{prop.} = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 845}{\frac{3 \cdot 10^8}{18 \cdot 10^9}}\right) = 116.08dB$$

Donat que la zona geogràfica on es durà a terme el muntatge és propensa a patir pluges torrencials en determinades èpoques de l'any, es farà un càlcul de l'atenuació introduïda per aquesta pluja.

Així, seguint la recomanació UIT-R P.838.3 es pot obtenir l'atenuació específica $\gamma_R(dB/km)$ a partir de la intensitat de pluja $R(mm/h)$ segons l'expressió

$$\gamma_R = kR^\alpha$$

on els valors dels coeficients $k$ i $\alpha$ es determinen en funció de la freqüència i $R$ pren un valor > 60 segons la classificació de l'AEMET [21]. Tenint en compte que es farà servir polarització horitzontal i seguint les taules facilitades a la recomanació UIT-R P.838.3, es pren $R = 65$ i es calcula aproximadament l'atenuació $\gamma_R$ com

$$\gamma_R = k_H R^{\alpha_H} = 0{,}07078 \cdot 65^{1.0818} = 6{,}47dB/km$$

que multiplicat per la distància real de l'enllaç, permet obtenir l'atenuació $\gamma_R$ deguda a la pluja per la freqüència utilitzada.

$$\gamma_R = \frac{6.47dB}{km} \cdot 0{,}845km = 5{,}47dB$$

[21] AEMET. Agencia Estatal de Meteorologia.

### 6.1.2 Guany de les antenes

El radioenllaç escollit disposa d'antenes de diàmetres de $0.3m$, $0.6m$, $0.9m$, $1.2m$ i $1.8m$. Es pot calcular el guany d'antena de forma matemàtica mitjançant l'expressió següent:

$$G = 10 \cdot \log\left[\eta \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot A_0}{\lambda^2}\right)\right], \qquad A_0 = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$$

on
$A_0$ = Àrea d'obertura de l'antena
$\eta$ = Eficiència d'obertura
d = Diàmetre de l'antena en metres

Per un valor típic de $\eta = 0.5$ es pot calcular el guany per cada diàmetre d'antena i s'obtenen els següents resultats:

| Diàmetre d'antena | Guany teòric calculat per $\eta = 0.5$ |
|---|---|
| $0.3m$ | $32.16dB$ |
| $0.6m$ | $38.01dB$ |
| $0.9m$ | $41.58dB$ |
| $1.2m$ | $44.08dB$ |
| $1.8m$ | $47.60dB$ |

Taula 1. Guany de les antenes en funció del seu diàmetre

### 6.1.3 Determinació de la potencia mínima d'emissió

El fabricant del radioenllaç estableix un llindar de recepció garantit per a l'ODU principal de $-79.5dBm$, per una BER de $10^{-6}$ en configuració 1+1 HSB utilitzant un acoblador de 6dB i fent servir QPSK.

La potencia màxima de sortida donada pel fabricant (mesurada a l'ODU) per una freqüència de $18GHz$ és de $25 \pm 2dBm$ per QPSK. En fer els càlculs, s'haurà de tenir en compte l'atenuació de 6dB introduïda a la ODU secundaria per l'acoblador no simètric.

Tenint en compte les pitjors condicions possibles com pluja intensa, lleugeres desalineacions de les antenes degudes a fort vent i un càlcul optimista de guanys d'antenes, es pot obtenir la potencia mínima a que s'haurà d'emetre $P_T[dBm]$ per tal de garantir la connexió a partir de l'expressió

$$P_T = P_R - G_T - G_R + P_p + \gamma_R + P_a$$

on

$P_R$, potencia rebuda

$G_T$ i $G_R$, guany de les antenes transmissora i receptora (0.3m de diàmetre).

$P_p$, pèrdues de propagació en espai lliure.

$\gamma_R$, pèrdues degudes a la pluja intensa.

$P_a$, pèrdues en l'acoblador pel camí (ODU) principal.

$$P_T = -79.5dB - 32.16dB - 32.16dB + 116.08dB + 5.47dB + 2dB = -20.27dBm$$

S'entén com a potencia rebuda $P_R$, la sensibilitat del receptor per a la freqüència de treball nominal.

En fer la posada en marxa de l'enllaç i a efectes d'atenuació introduïts per l'acoblador asimètric, cal tenir en compte que els paràmetres d'ATPC[22] en sistemes 1+1 HSB, només afecten l'ODU principal.

Tot i que l'ATPC està pensat per densificar una xarxa reutilitzant freqüències, en aquest cas es fa servir per reduir la potencia d'emissió en els transmissors, sempre que es garanteixi una bona qualitat de recepció. L'ATPC permet un rang dinàmic de regulació de $20dB$.

## 6.2 Diagrama de blocs

Un cop escollit el hardware necessari i la seva configuració, es pot començar a dissenyar la interconnexió dels diferents subsistemes. A continuació es mostra un esquema del conjunt en forma de diagrama de blocs.

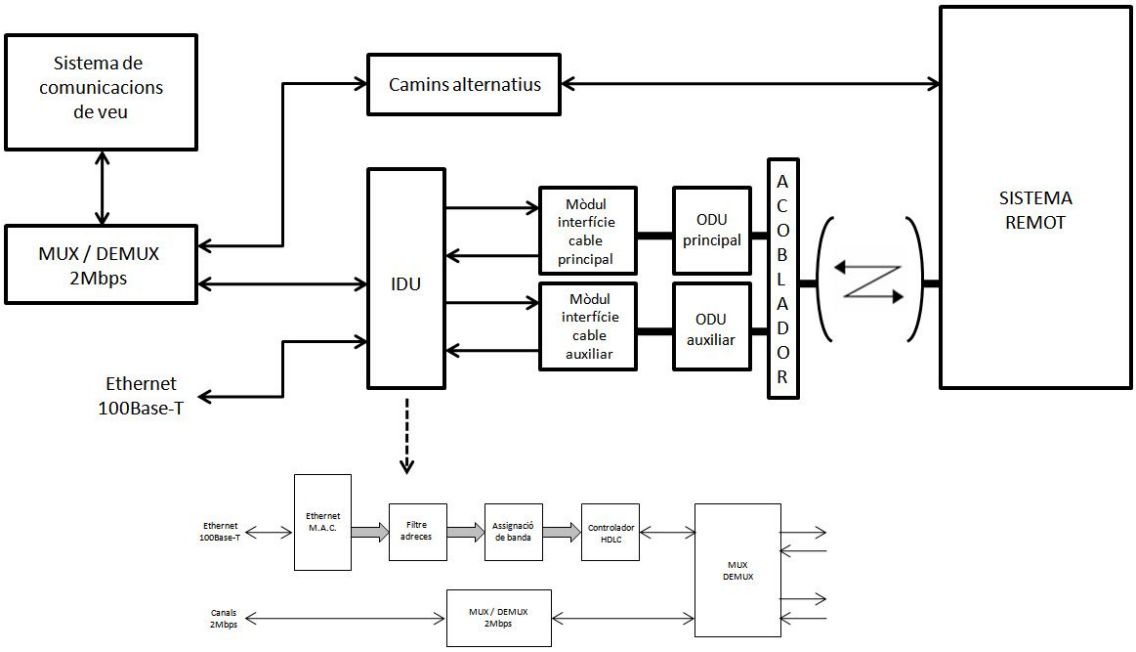



Fig.12 Diagrama de blocs del sistema

[22] ATPC. Regulació automàtica de la potencia transmesa.

## 6.3 Connexió amb el MUX de primer ordre

Pel que es refereix als tributaris E1, la IDU pot funcionar en mode 120Ω simètric o 75Ω coaxial asimètric. D'aquesta manera, la interconnexió entre els equips es pot configurar segons els requeriments o característiques del hardware.

En aquest cas, s'escollirà el mode asimètric ja que el MUX E1 disposa d'una interfície de 75Ω coaxial que connecta amb el MUX de segon ordre. Aquesta interfície es derivarà al connector DB25 de l'enllaç, fent servir els adaptadors necessaris i realitzant el connexionat d'acord al *pinout* donat pel fabricant.

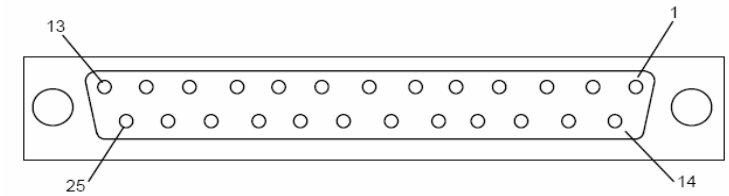



Fig.13 Connector DB25 de la IDU per tributaris E1

| Pin | Senyal | Mode 120 Ohm simètric | Mode 75 Ohm asimètric |
|---|---|---|---|
| 1 | GND | Massa | Massa |
| 14 | TXHDB3P1 | Emissió canal nº1 -P | Emissió canal nº1 |
| 2 | GND | Massa | Massa |
| 15 | TXHDB3N1 | Emissió canal nº1 -N | Connexió a la massa per cable |
| 3 | RXHDB3P1 | Recepció canal nº1 - P | Recepció canal nº1 |
| 16 | GND | Massa | Massa |
| 4 | RXHDB3N1 | Recepció canal nº1 - N | Connexió a la massa per cable |
| 17 | TXHDB3P2 | Emissió canal nº2 -P | Emissió canal nº2 |
| 5 | GND | Massa | Massa |
| 18 | TXHDB3N2 | Emissió canal nº2 -N | Connexió a la massa per cable |
| 6 | RXHDB3P2 | Recepció canal nº2 - P | Recepció canal nº2 |
| 19 | GND | Massa | Massa |
| 7 | RXHDB3N2 | Recepció canal nº2 - N | Connexió a la massa per cable |
| 20 | TXHDB3P3 | Emissió canal nº3 -P | Emissió canal nº3 |
| 8 | GND | Massa | Massa |
| 21 | TXHDB3N3 | Emissió canal nº3 -N | Connexió a la massa per cable |
| 9 | RXHDB3P3 | Recepció canal nº3 - P | Recepció canal nº3 |
| 22 | GND | Massa | Massa |
| 10 | RXHDB3N3 | Recepció canal nº3 - N | Connexió a la massa per cable |
| 23 | TXHDB3P4 | Emissió canal nº4 -P | Emissió canal nº4 |
| 11 | GND | Massa | Massa |
| 24 | TXHDB3N4 | Emissió canal nº4 -N | Connexió a la massa per cable |
| 12 | RXHDB3P4 | Recepció canal nº4 - P | Recepció canal nº4 |
| 25 | GND | Massa | Massa |
| 13 | RXHDB3N4 | Recepció canal nº4 - N | Connexió a la massa per cable |

Taula 2. Pinout del connector DB25 de la IDU per tributaris E1

# 7. Interferències amb altres sistemes en funcionament

## 7.1 Metodologia de treball

Per analitzar les possibles interferències provinents d'altres sistemes en funcionament, es faran mesures de la seva ocupació espectral en règim de funcionament normal. Així, en cas d'existir harmònics propers a la freqüència de treball del radioenllaç, es mesurarà la seva potencia.

Per fer les mesures es farà servir un acoblador direccional amb una atenuació de 50dB connectat en sèrie entre l'equip i l'antena [23], de manera que la captura obtinguda representarà fidelment l'espectre emès. L'analitzador d'espectre utilitzat es un Rohde&Schwartz FSW26.

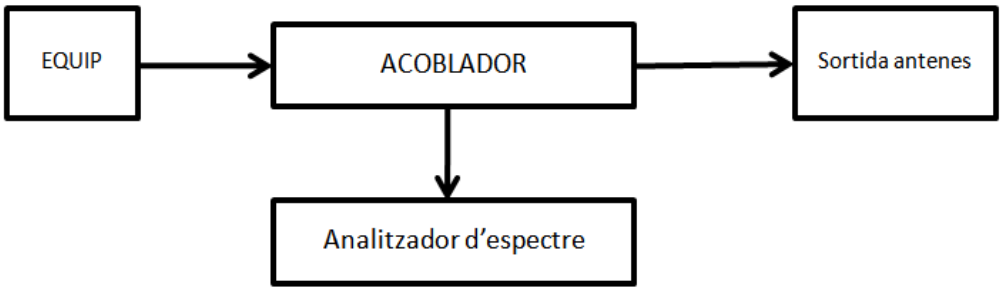



Fig.14 Diagrama de blocs del muntatge per mesurar els espectres emesos.

Aquest es un mètode que només permet comprovar els harmònics emesos pels equips en funcionament en la banda de treball de l'enllaç. Posteriorment i en la etapa de muntatge i configuració del radioenllaç, es farà un escombrat a les freqüències properes a la de treball (fent servir el maquinari i programari facilitat pel fabricant del radioenllaç), per tal de detectar possibles senyals interferents. Si se'n troben, caldrà utilitzar altres parells de canals segons les directrius establertes a la norma UN-69 [24].

## 7.2 Anàlisi espectral dels senyals transmesos pels sistemes en funcionament

**Sistema 1.** Portadora a la banda de VHF, modulada en amplitud al 30% per una subportadora de 10KHz. Potencia de pic d'emissió d'1KW amb antena omnidireccional, separat 731 metres de l'estació emissora més propera de l'enllaç.

[23] Les antenes monitores dels equips son les instal·lades per cada fabricant, i tenen un ample de banda aproximat del 10% de les freqüències nominals de treball de cada equip. Les antenes que s'utilitzaran per mesurar el soroll en banda de 18GHz, son les facilitades pel fabricant del radioenllaç, ja que l'analitzador d'espectres es capaç de detectar un senyal de -150dBm pels harmònics fins a 25GHz, sense necessitat d'amplificadors externs.

[24] Veure l'annex 1, nota UN-69.

Per tenir una idea de l'espectre emès per l'equip, es mostra una captura del senyal captat des de una antena monitora de camp.

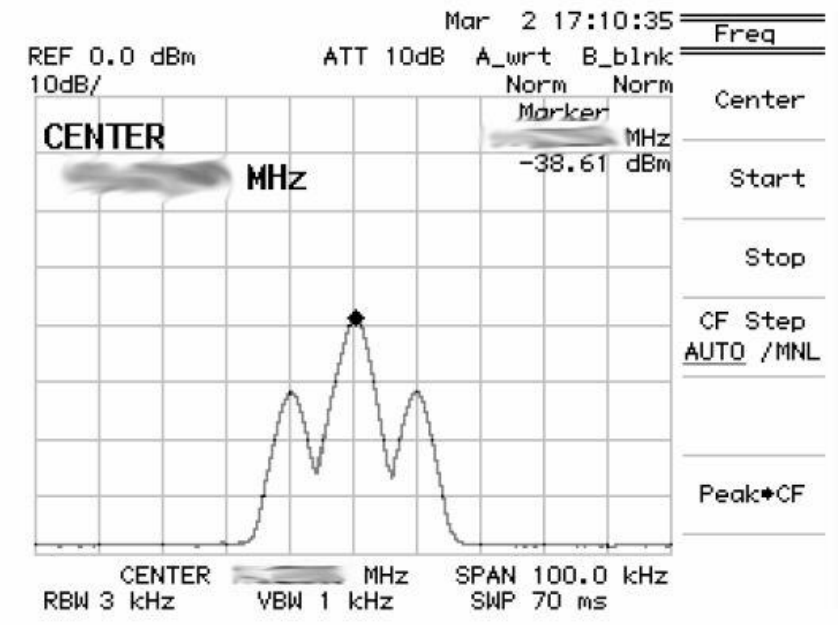



Fig.15 Ocupació espectral de l'equip 1 en condicions normals de treball.

Es prenen mesures dels primers harmònics amb l'analitzador d'espectre, obtenint unes atenuacions mínimes de $50dB$ pel primer harmònic respecte de la potencia en la freqüència fonamental. La mesura per 18GHz dona una atenuació de $-77.94dB$ respecte la freqüència nominal. Aquest nivell de potencia és comparable al soroll del canal i per tant, no interfereix al radioenllaç.

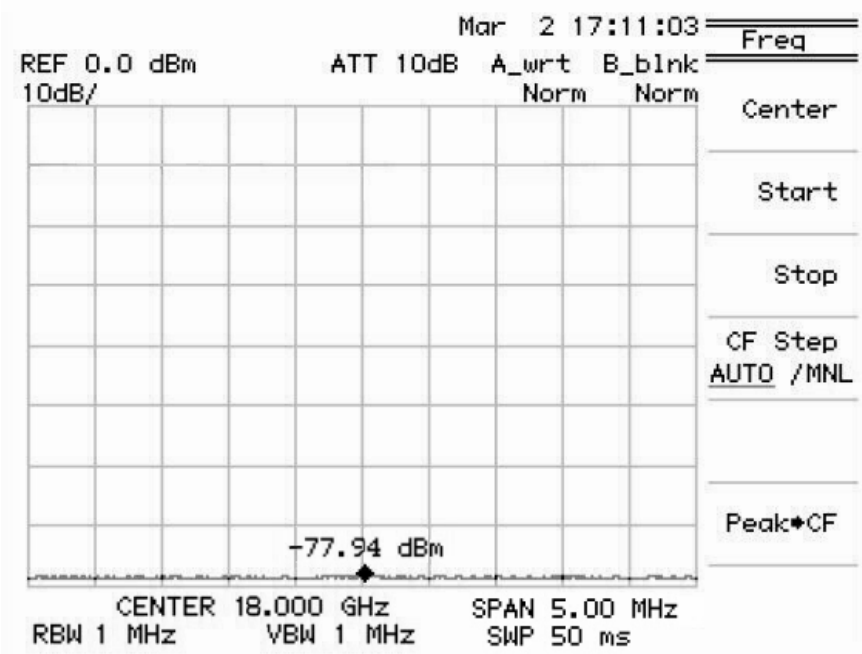



Fig.16 Anàlisi de l'espectre emès per l'equip 1 a la banda de 18GHz.

**Sistema 2.** Portadora a l'entorn de 1.2GHz amb una potencia de pic d'1KW modulada amb polsos cosinusoidals. Antena omnidireccional situada a una distancia de 737 metres.

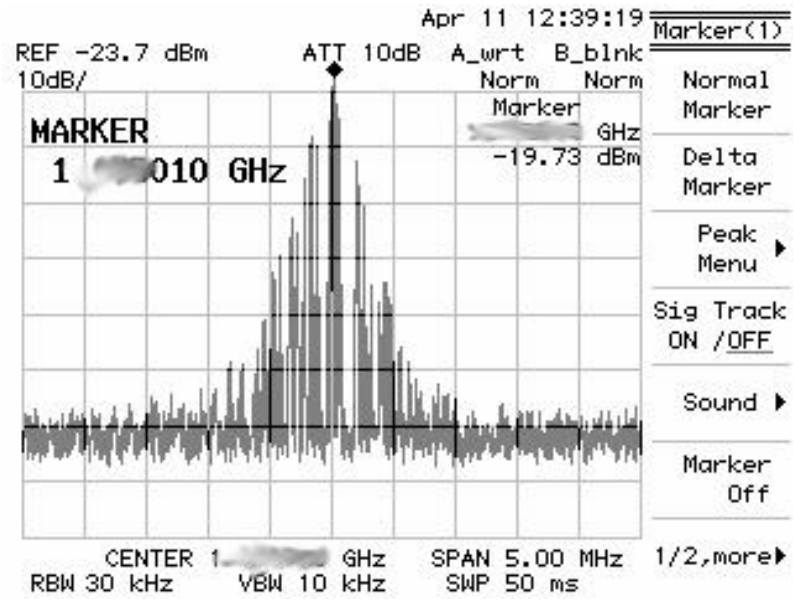



Fig.17 Anàlisi de l'espectre emès per l'equip 2 en condicions normals de treball.

La captura anterior mostra l'ocupació espectral al voltant de la freqüència de treball de l'equip.

A continuació, es veu la captura per una freqüència de 18GHz amb una atenuació de $-88.76dB$ respecte al senyal a la freqüència nominal de treball. Aquest nivell de potencia és comparable al soroll del canal i per tant, no interfereix al radioenllaç.

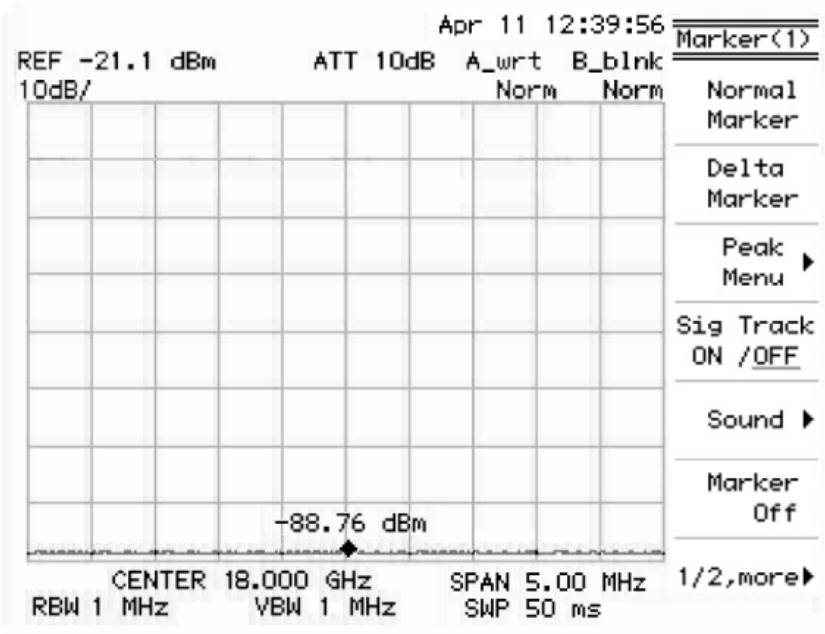



Fig.18 Espectre emès per l'equip 2 a la banda de 18GHz.

**Sistema 3.** Portadora situada a la banda UHF 1GHz a una distancia de 1317 metres. Antena omnidireccional amb una potencia de sortida de 100W. S'han fet les mesures adients sense apreciar senyals d'interferència, el contingut espectral a la banda de 18GHz és comparable al nivell del soroll.

**Sistema 4.** Dues portadores situades a la banda UHF per sobre dels 300MHz a una distancia de 1314 metres. Antena direccional orientada en direcció contraria respecte del feix del radioenllaç amb una potencia de sortida de 30W. S'han fet les mesures adients sense apreciar senyals d'interferència; el contingut espectral a la banda de 18GHz és comparable al nivell del soroll.

**Sistema 5.** Portadora situada a la banda UHF per sobre dels 330MHz a una distancia de 1320 metres. Antena direccional orientada ortogonalment al feix del radioenllaç amb un potencia d'emissió de 30W. S'han fet les mesures adients sense apreciar senyals d'interferència; el contingut espectral a la banda de 18GHz és comparable al nivell del soroll.

## 7.3 Conclusió

De l'anàlisi de les dades recollides a les mesures de camp i internes dels propis equips analitzats, es dedueix que aquests compten amb mesures adequades per garantir la supressió d'harmònics indesitjats, com poden ser filtres passabanda de sortida, bona qualitat i disseny de les targetes de síntesi d'àudio i amplificadors de potencia, etc.

Així, es pot concloure que no causaran interferències en el funcionament del radioenllaç, ja que el nivell de potencia dels harmònics generats a la banda de 18GHz és comparable al soroll del canal.

Un cop es faci la implementació física de l'enllaç i abans de fer la posada en funcionament, es faran noves mesures per tal de determinar si s'han produït canvis en els sistemes que puguin interferir en el servei.

# 8. Simulació del sistema

## 8.1 Metodologia i programari a utilitzar

Com a programari de simulació s'utilitzarà l'eina Radio Mobile [25]. Aquest software es capaç de fer simulacions i dissenys de xarxes de comunicacions de manera precisa, ja que permet descarregar els perfils geogràfics de qualsevol zona només posant-hi les coordenades geogràfiques, amb una resolució de 3" d'arc ≈ 90 metres.

Radio Mobile utilitza un model de propagació conegut com model de terreny irregular basat en l'algoritme de Longley-Rice [26], que permet determinar l'àrea de cobertura de qualsevol sistema de comunicacions que treballi en una freqüència compresa entre els 20MHz i els 20GHz.

S'utilitzarà un patró d'antena molt directiu per emular el comportament de les antenes instal·lades. El guany assignat serà el calculat al punt 6.1.2 i es tindrà en compte l'atenuació de 2dB de l'antena principal, introduïda per l'acoblador asimètric.

## 8.2 Simulació de l'enllaç amb la potencia mínima calculada

La següent captura mostra la viabilitat de l'enllaç en sentit centre d'emissors, a la potencia mínima necessària calculada a l'apartat 6.1.3. El color verd indica la correcta comunicació entre els dos punts de l'enllaç.

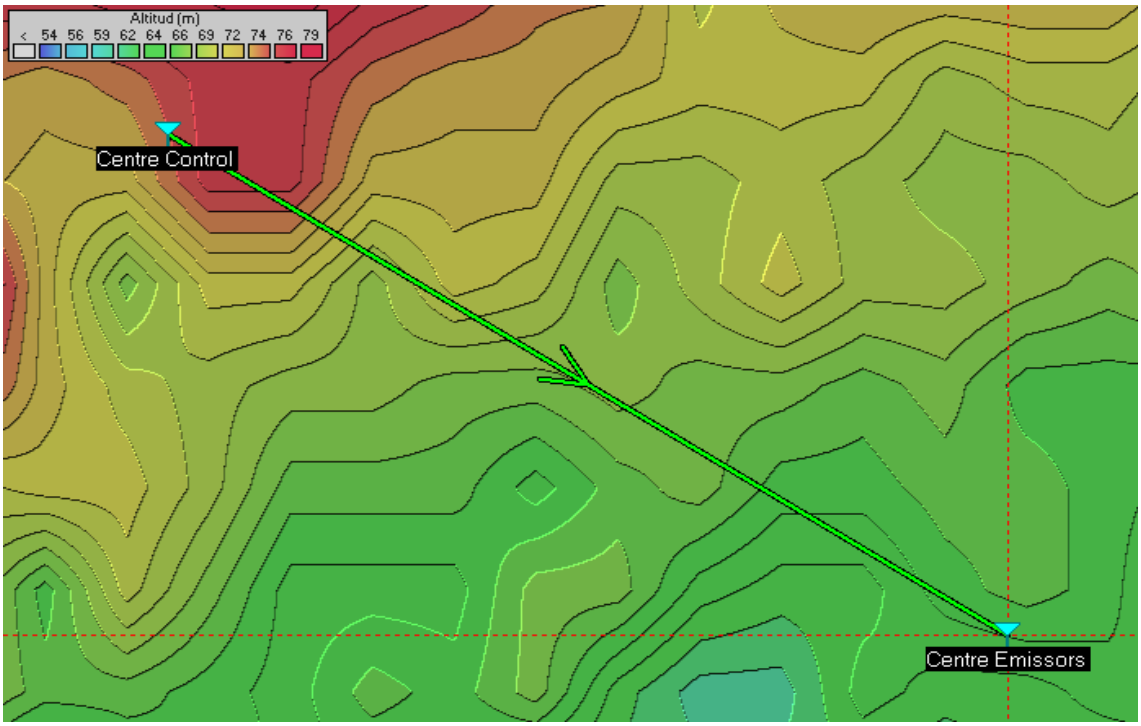



Fig.19 Viabilitat de l'enllaç en sentit Centre de Control a Centre d'Emissors.

[25] Radio Mobile es troba disponible de manera gratuïta a http://www.cplus.org/rmw/english1.html
[26] Veure annex 4.

La figura 20 mostra el diagrama de cobertura per la potencia mínima transmesa en direcció Centre de control → Centre d'emissors.

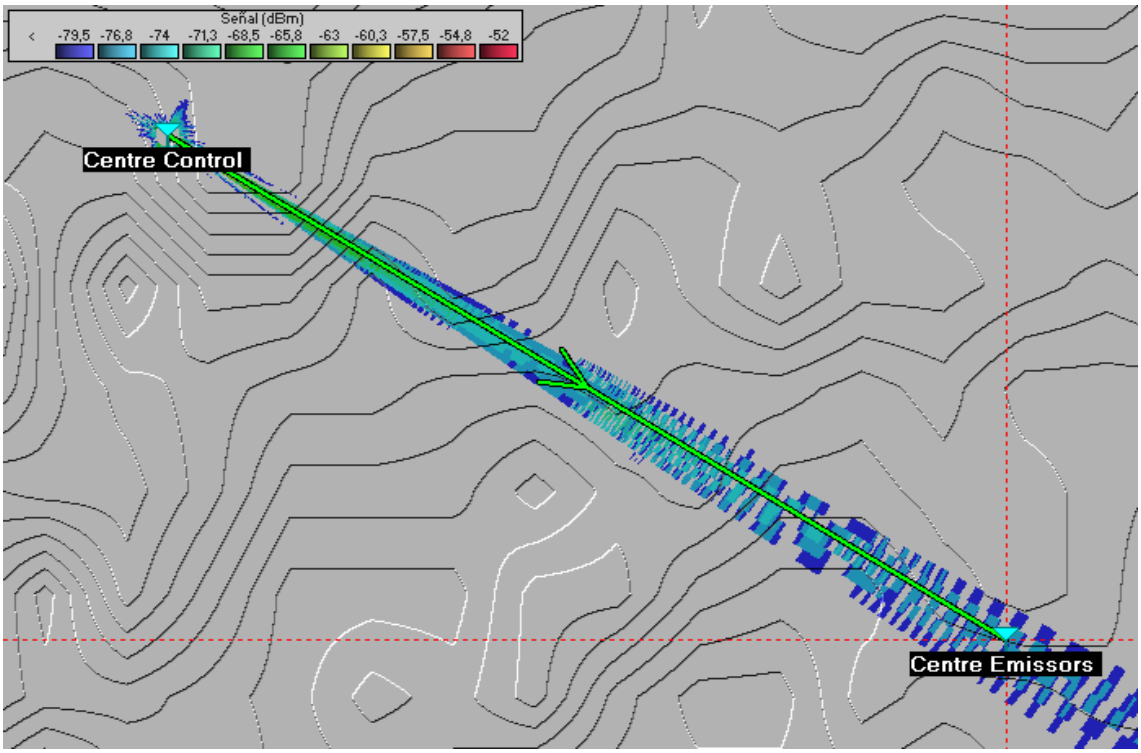



Fig.20 diagrama de cobertura per la potencia mínima transmesa.

El càlcul estadístic (figura 21) mostra una alta probabilitat d'error en la recepció, degut a l'escàs marge entre potencia rebuda i sensibilitat del receptor.

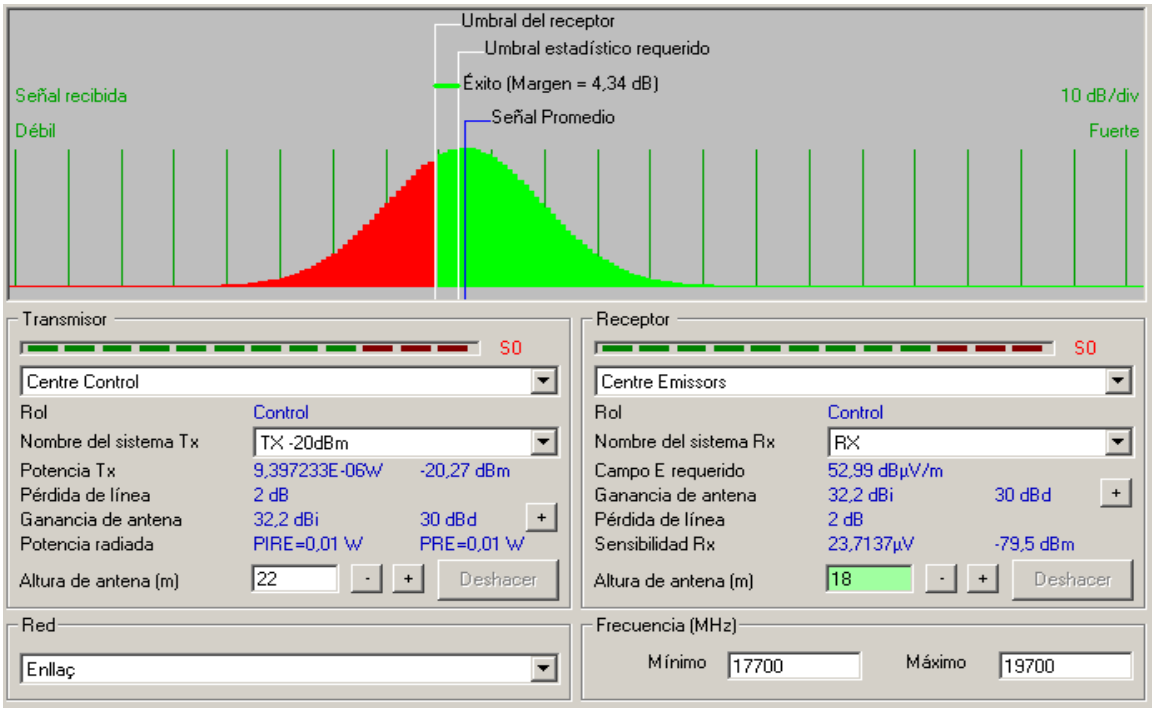



Fig.21 Càlcul estadístic de la probabilitat d'error al trajecte.

Per analitzar els resultats obtinguts a les simulacions de l'enllaç s'utilitzarà l'eina Radio Link [27], que permet obtenir entre d'altres les dades següents:

- Azimut d'orientació de l'antena emissora
- Angle d'elevació de l'antena
- Pèrdues en espai lliure
- Distancia de l'enllaç
- Pitjor angle de Fresnel del trajecte
- Nivell RX relatiu respecte a la sensibilitat

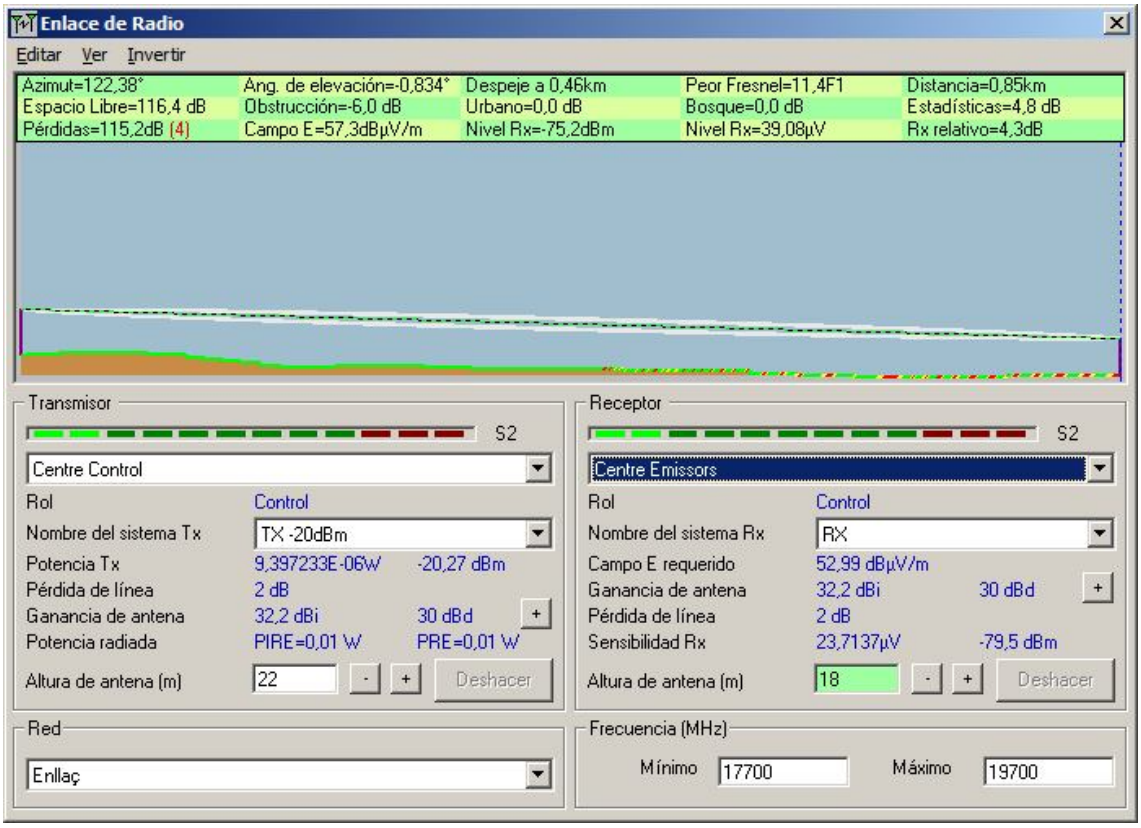



Fig.22 Resultats de la simulació en direcció Centre de Control a Centre d'Emissors.

La simulació confirma els càlculs d'atenuació que es van fer a l'apartat 6.1.1. El marge relatiu de potencia rebuda respecte del llindar de recepció és de 4,34$dB$, el que implica una mínima tolerància a errors en la recepció.

Aquestes dades seran d'especial interès per dur a terme el procés de muntatge del hardware, en particular les dades d'orientació de les antenes (azimut i inclinació) i potencia a emetre des dels dos extrems de l'enllaç.

A continuació es mostra una simulació en sentit contrari, es a dir, en direcció al Centre de Control.

[27] Aquesta eina s'inclou com a programari complementari dins la suite Radio Mobile.

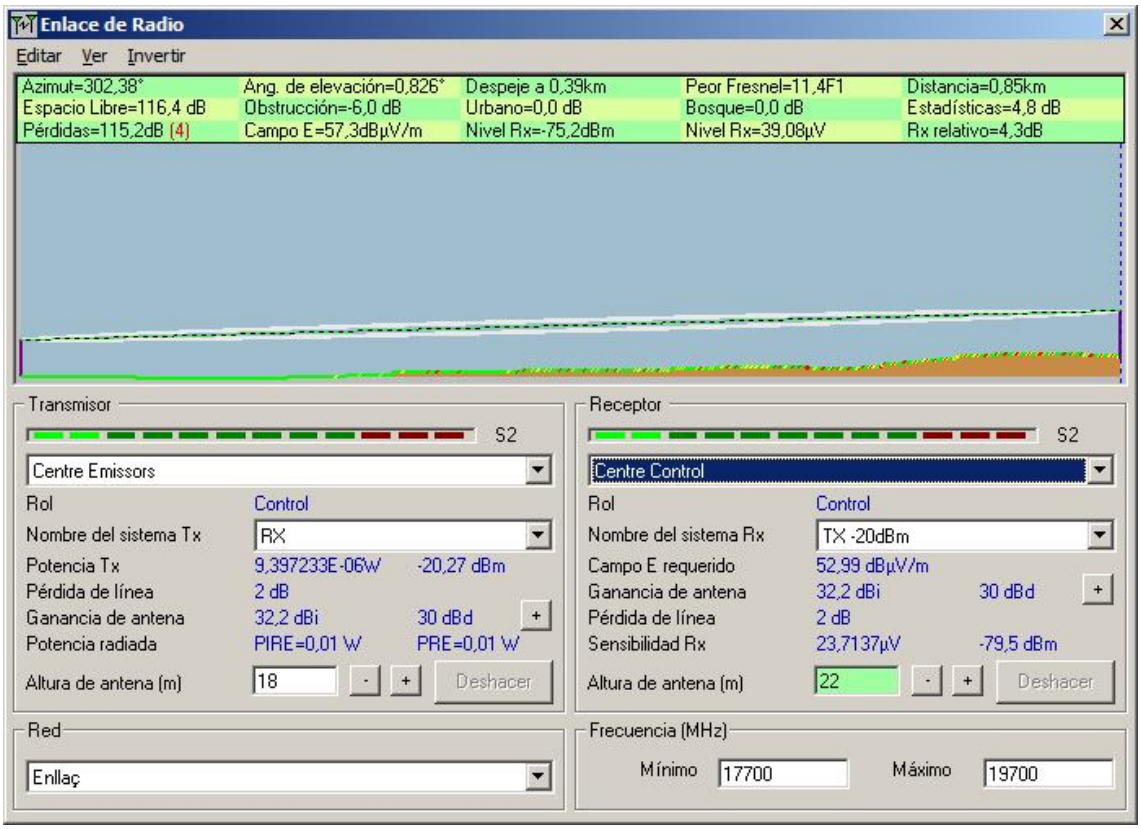



Fig.23 Resultats de la simulació en direcció Centre d'Emissors a Centre de Control.

## 8.3 Simulació de l'enllaç a la potencia nominal de treball

Per determinar de manera aproximada la potencia d'emissió en condicions normals de treball, es farà un càlcul de la potencia necessària a emetre en el pitjor cas possible. Així, es tindran en compte els següents paràmetres:

- Pèrdues dels acobladors asimètrics per les ODU auxiliars ($2 \cdot 6dB = 12dB$)
- Toleràncies negatives de guany de les antenes ($2X3dB = 6dB$)
- Pèrdues al cablejat entre les ODU i les antenes ($2X1.35dB = 2.70dB$ per a cable coaxial tipus RG-8/U Belden 9914)
- Pèrdues en connectors ($4X0{,}9dB = 3{,}6dB$)

Si les pèrdues addicionals es poden estimar en $24.3dB$ i la potencia mínima que fa viable l'enllaç és de $-20.27dBm$, la potencia nominal de treball s'hauria d'establir en l'entorn de $24.3 - 20.27 = 4.03dBm$.

Com que la implementació física comporta la utilització del sistema d'ATPC proveït pel fabricant, que té un rang dinàmic de 20dB, s'establirà la potencia d'emissió de manera que es pugui aprofitar la potencia màxima d'emissió de l'equipament en moments de necessitat. Per tant se situarà el nivell de potencia a emetre el més a prop possible del centre de la banda de treball de l'ATPC, es a dir als $14dBm$.

La figura 24 mostra una simulació amb el nivell de potencia proposat ($14dBm$) i les pèrdues addicionals estimades. A L'annex 3 es mostra el patró d'antena utilitzat a totes les simulacions.

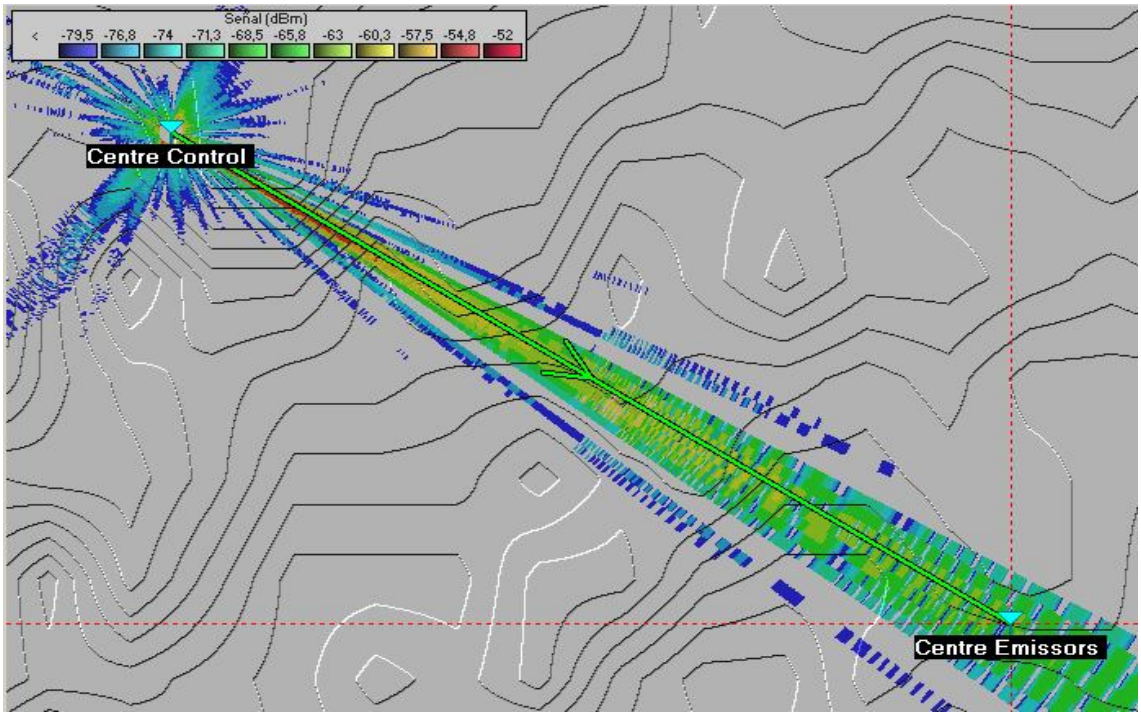



Fig.24 Cobertura de l'enllaç per al pitjor cas, amb una potencia d'emissió de 14dBm.

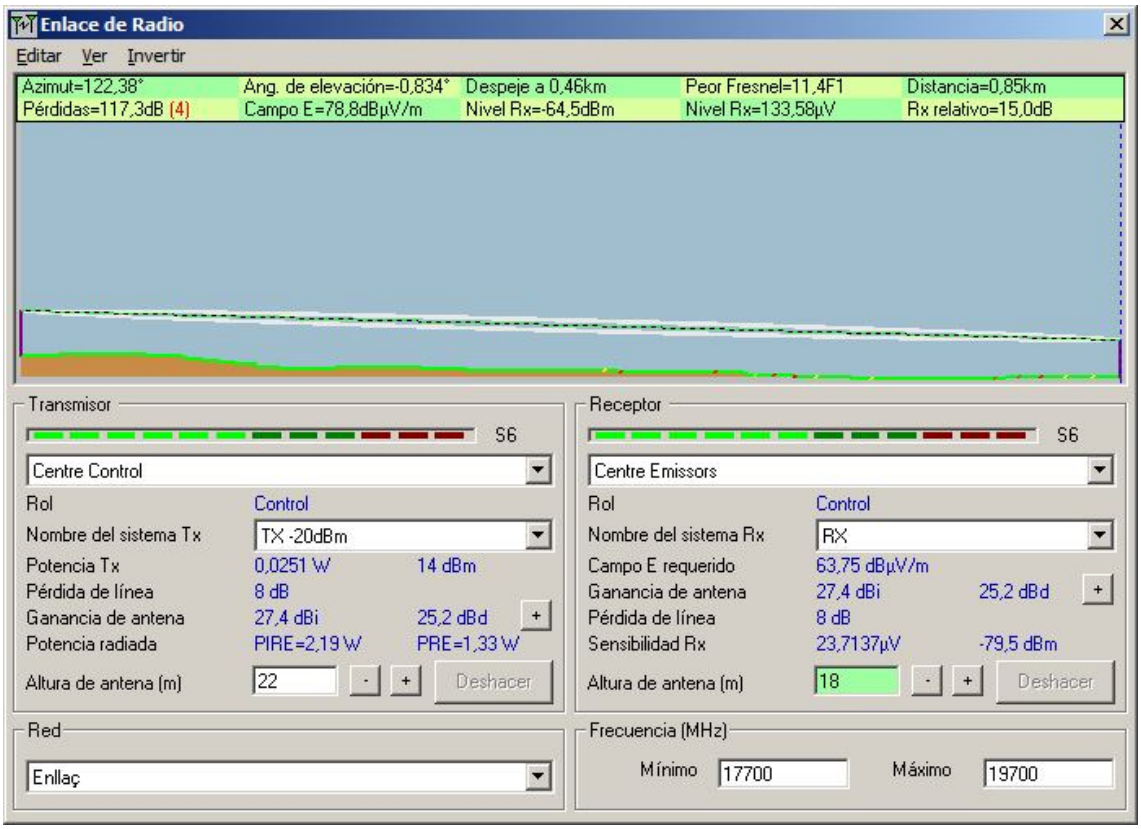
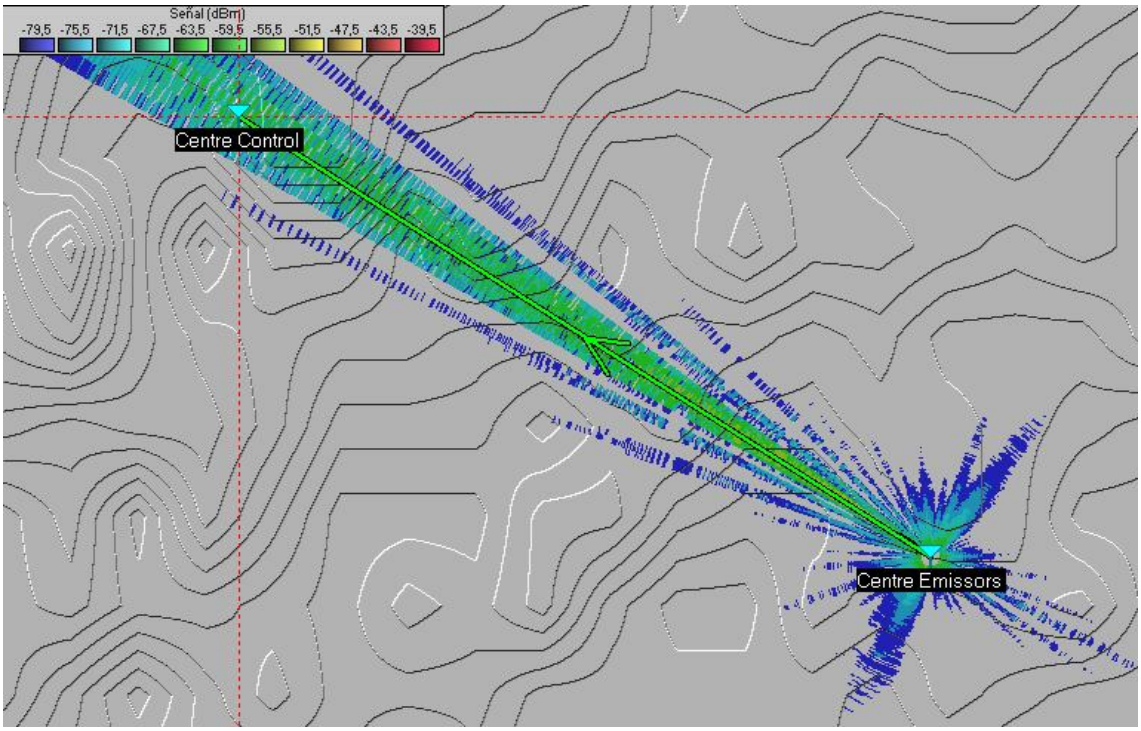



Fig.25 Resultats de la simulació amb una potencia d'emissió de 14dBm.

I la mateixa simulació però en direcció Centre d'emissors → Centre de control, amb resultats similars quant a cobertura i nivell de senyal rebut.



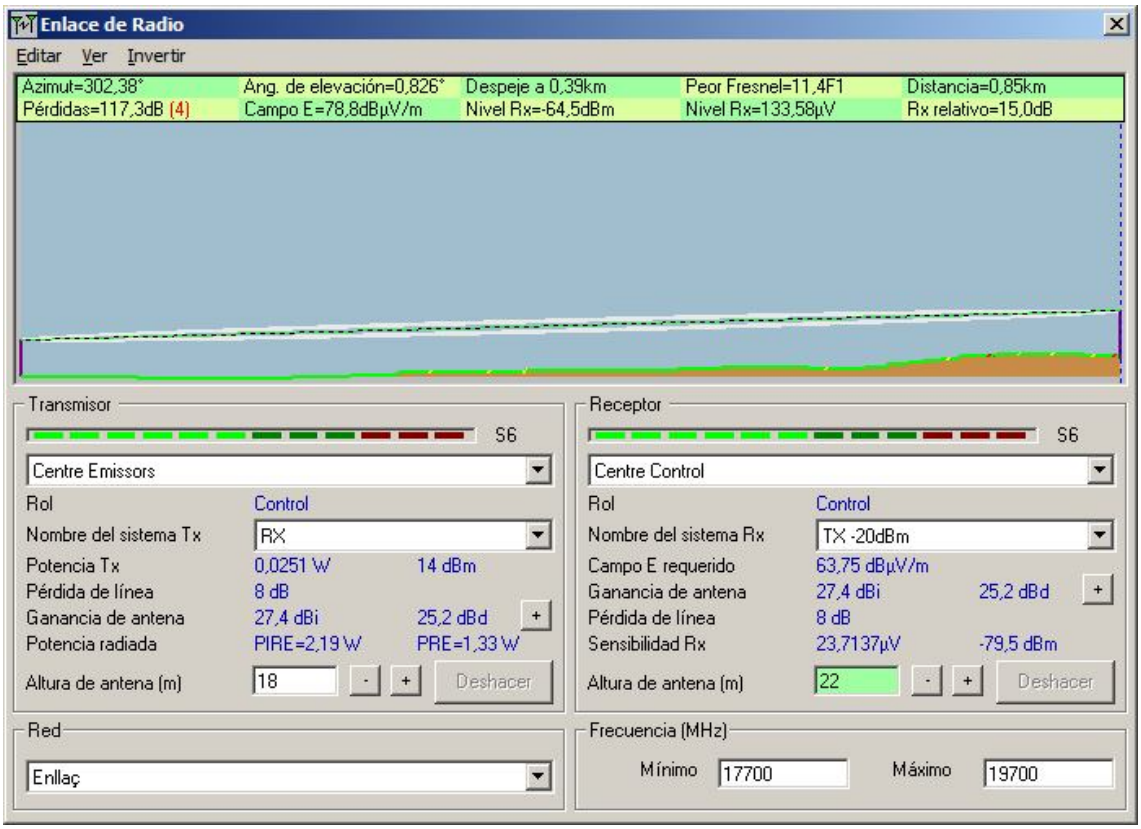




Fig.25 bis. Resultats de la simulació amb una potencia d'emissió de 14dBm.

# 9. Muntatge del hardware

## 9.1 Instal·lació de les IDU

La IDU està constituïda per un xassís de 19" 1U i comprèn les interfícies d'usuari, el microprocessador, el MUX i el DEMUX. Es cargolarà als muntants del rack amb cargols M6 d'acer inoxidable, de manera que es garanteixi la connexió de massa entre la IDU i el bastidor.

En cas de muntar diverses IDU al mateix rack, es aconsellable deixar un espai de 1U per afavorir la dissipació tèrmica. També es aconsellable la instal·lació d'una unitat de ventilació per a la extracció d'aire a la part superior del rack.

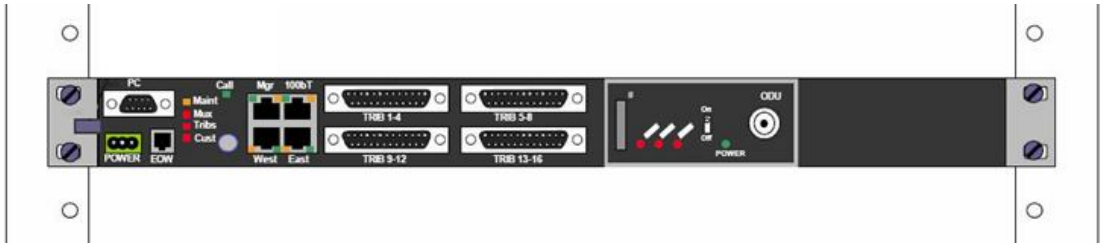



Fig.26 Muntatge de la IDU.

## 9.2 Instal·lació del conjunt ODU+antena

En configuració 1+1 HSB, l'acoblador es fixa sobre l'antena integrada en la mateixa posició, sense importar el tipus de polarització utilitzada. Les ODU es munten a cada banda de l'acoblador mitjançant les seves fixacions. La pràctica habitual es muntar l'acoblador per tenir la ODU principal a la dreta vist pel darrera.

Per ajustar la polarització caldrà muntar les ODU en posició vertical i seleccionar la polarització vertical o horitzontal fent girar 90º el cèrcol corresponent a l'accés antena.

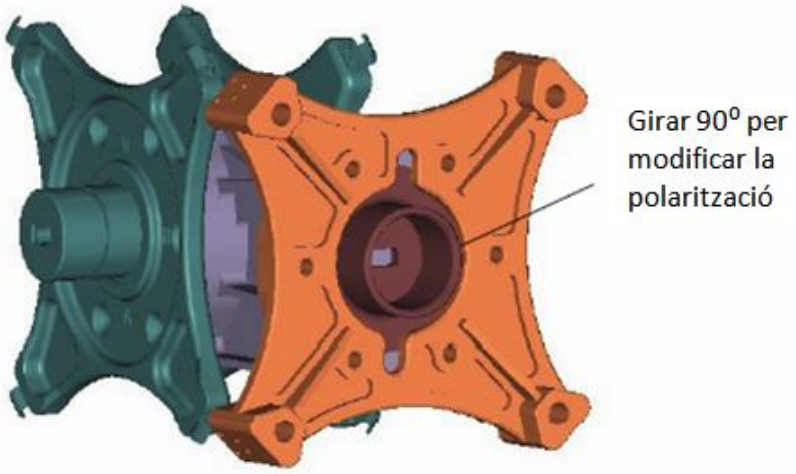



Fig.27 Selecció de la polarització.

En cas que l'antena tingui una interfície consistent en una guia d'ones rectangular, serà necessari girar la font de l'antena per canviar la polarització, de manera que el costat gran de la guia d'ones es muntarà en posició vertical quan la polarització sigui horitzontal i viceversa.

Cada ODU es connectarà a la seva IDU amb un cable coaxial de 50Ω tipus *Belden 9914* o *Andrew LDF 4-50* segons la distancia que les separa (*Belden* fins a 230 metres o *Andrew* fins a 600 metres) amb connectors N mascle a cada extrem.

Els cables seran degudament etiquetats per identificar correctament la ODU principal i l'auxiliar. També s'haurà de garantir l'estanqueïtat dels connectors mitjançant l'aplicació de cinta vulcanitzada i una adequada posada a terra del conjunt com a protecció contra els efectes dels llamps.

El conjunt antena+ODU+acoblador es muntarà sobre un tub de diàmetre comprès entre 88.9mm i 114mm amb els suports adequats. S'ha de preveure un espai suficient per poder girar l'antena ±10° respecte de l'eix i comprovar que no existeixen obstacles entre els dos extrems de l'enllaç.

Fig.28 Configuració 1+1 amb acoblador i antena integrada. Exemple de muntatge.

Tot i que es pràctica habitual al sector instal·lar les antenes en màstils mòbils per facilitar-ne el manteniment, en aquest cas es muntarà en un tub fix per assegurar la correcta alineació entre els dos extrems.

# 10. Posada en servei i configuració de l'enllaç

La configuració preliminar es farà de manera independent per als dos extrems de l'enllaç. Un cop establerta la comunicació es pot fer el control del funcionament des de qualsevol dels dos emplaçaments.

El procés de configuració es farà a través del software de gestió i supervisió facilitat pel fabricant, mitjançant una connexió local RS232 o Ethernet amb el PC de gestió. Aquest programari permet visualitzar i modificar tots els paràmetres de l'enllaç i dur a terme les operacions de manteniment programades.

## 10.1 Posada en servei de l'enllaç

1. Per poder establir l'enllaç s'hauran de fixar a cada extrem de l'enllaç els següents paràmetres:
   - Freqüència de transmissió
   - Tipus de modulació i velocitat
   - Potencia transmesa. L'ATPC s'haurà de desactivar en aquesta etapa
   - El Link ID o codi d'identificació de l'enllaç

Un cop configurats aquests paràmetres als dos extrems, es podrà fer l'alineament de les antenes per tal que s'estableixi l'enllaç.

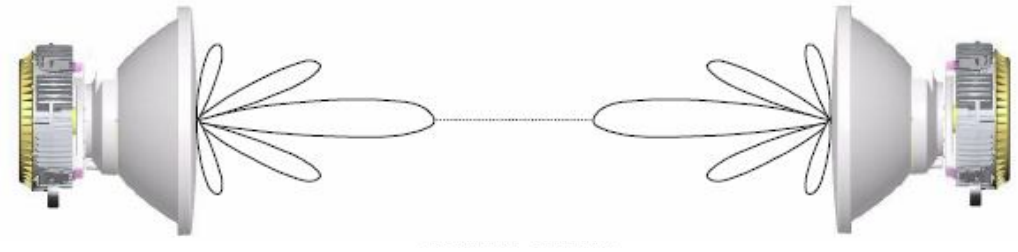


Fig.29 Orientació correcta de les antenes.

Es comprovarà mitjançant el programari de control, que el nivell de camp rebut s'ajusta als valors calculats a l'apartat 6.1 segons la potencia emesa. Així mateix, es pot mesurar la tensió al connector BNC de la ODU de manera que el seu valor no superi els 4,5V [28]. En cas de ser així, caldrà reduir la potencia d'emissió per tal d'evitar saturacions.

[28] La tensió de camp rebut ($RSL$), és proporcional al nivell de camp rebut expressat en $dBm$. Una tensió $RSL$ de 4,5$V$ correspon a un camp rebut a l'entrada de la ODU de $-20dBm$.

També caldrà tenir en compte l'atenuació introduïda per l'acoblador asimètric i les possibles pèrdues per cablejat i connectors.

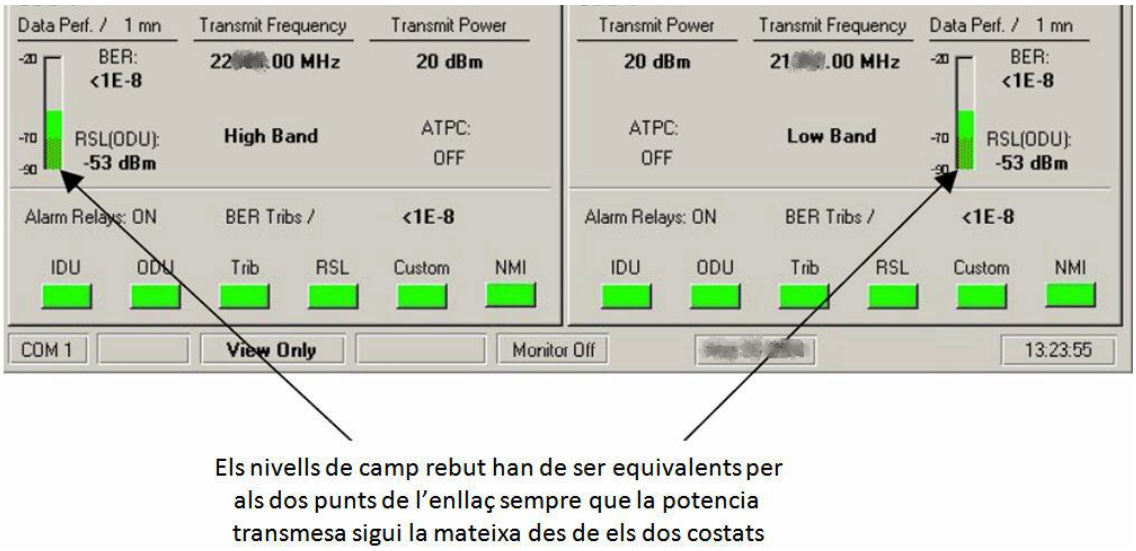



Fig.30 Nivell de camp rebut per les antenes.

2. A continuació caldrà fer un anàlisi de l'espectre a l'entrada de la ODU al voltant de la freqüència seleccionada. Aquesta mesura es farà amb el transmissor local apagat per evitar interferències degudes al possible retorn de senyal pel duplexor.

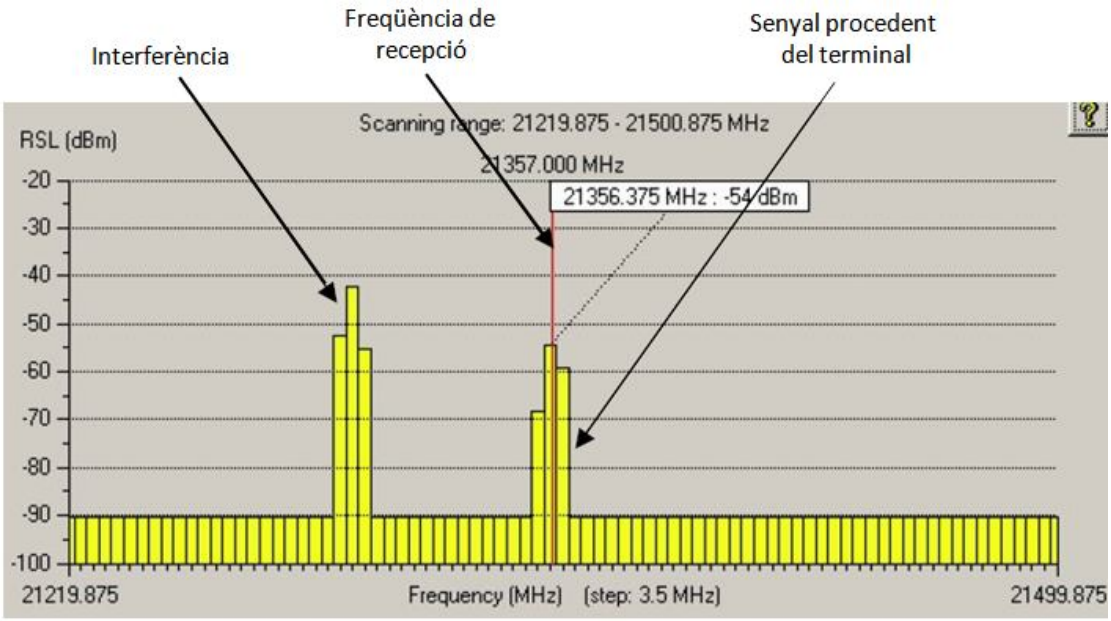



Fig.31 Escombrat de freqüència a la banda de proves.

La figura 31 mostra un escombrat entre els 21,22GHz i els 21,5GHz, amb un senyal interferent a la freqüència de 21,3GHz. Aquest senyal correspon a un altre enllaç que

està operatiu en la zona de treball, que no interferirà al treballar en una freqüència diferent.

3. Després de connectar l'equip al MUX segons es detalla a l'apartat 6.3, es procedirà a la comprovació dels canals de 2Mbps mitjançant un analitzador de transmissió ajustat segons les característiques de la instal·lació.

   També es comprovarà la correcta senyalització de les alarmes. Un manera senzilla pot ser simulant una alarma IDU mitjançant un tall d'alimentació del terminal local o la introducció d'un *Link Id*. erroni.

4. A continuació es comprovarà que es produeix la commutació entre les unitats de transmissió i recepció d'acord a les toleràncies definides. Així, es connectarà un analitzador de taxa d'errors a un dels canals de 2Mbps i es farà un bucle en el terminal remot del tributari a comprovar.

   Després es farà un canvi d'equip RX[29] forçant la commutació via software, que es deurà materialitzar sense que es detectin errors. Per acabar, es commutarà al TX [30] de reserva i es comprovarà que la taxa d'errors sigui menor de $2 \cdot 10^{-6}$ com a mínim durant un minut.

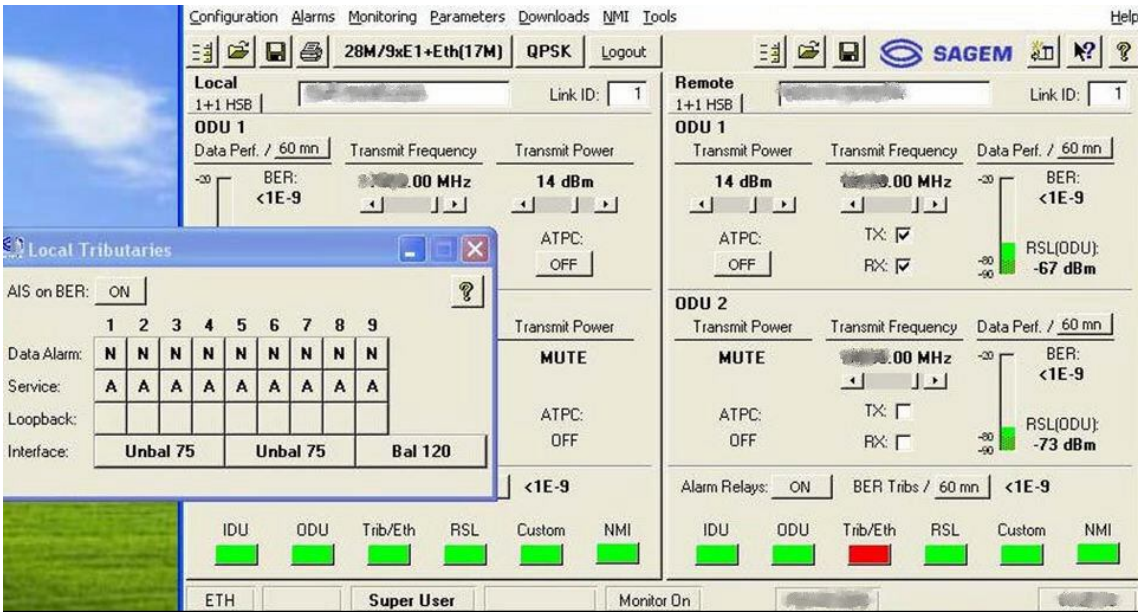



Fig.32. Bucle en un tributari 2Mbps.

## 10.2 Configuració del tràfic Ethernet de l'enllaç

Per configurar el tràfic Ethernet caldrà connectar ordinadors en ambdós extrems del radioenllaç i accedir al menú de configuració local. Es pot veure que en aquest cas, s'ha

[29] RX. Receptor.
[30] TX. Transmissor.

escollit un ample de banda de 28MHz amb QPSK, i s'ha assignat a la xarxa Ethernet un ample de banda de 17MHz que es combina amb nou canals E1.

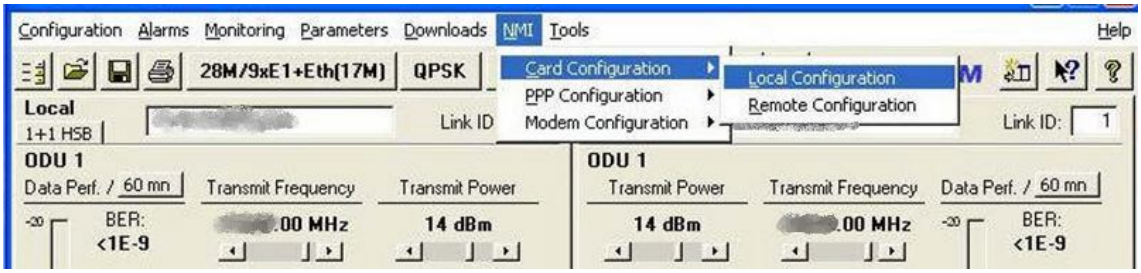



Fig.33. Programari configuració opció Ethernet.

Posteriorment es configurarà la xarxa segons les necessitats de servei i es farà un PING per comprovar la connectivitat entre els extrems.

Fig.34. Assignació adreces IP

Finalment s'escollirà la funció bridge, es definirà la interfície Ethernet com a 100BaseT full dúplex i s'activarà o inhibirà el filtre d'adreces MAC en funció del disseny de la xarxa. A continuació es mostra la configuració activa escollida entre totes les possibles.

| Canal | 27MHz - 16QAM | | 27,5MHz - QPSK o 13,75MHz - 16QAM | | 13,75MHz - QPSK o 7MHz - 16QAM | | 7MHz - QPSK | | 3,5MHz - QPSK | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Equivalent nX2Mbps | 34E1 | | 17E1 | | 8E1 | | 4E1 | | 2E1 | |
| Equivalent Ethernet | Num. E1 | Bandwidth Ethernet | Num. E1 | Bandwidth Ethernet | Num. E1 | Bandwidth Ethernet | Num. E1 | Bandwidth Ethernet | Num. E1 | Bandwidth Ethernet |
| | | | | | 0 | 17 | 0 | 8.5 | 0 | 4.2 |
| | 1 | 68 | 1 | 34 | 1 | 14.9 | 1 | 6.3 | 1 | 2.1 |
| | 2 | 66 | 2 | 31.9 | 2 | 12.7 | 2 | 4.2 | | |
| | 3 | 63.9 | 3 | 29.8 | | | | | | |
| | | | | | 4 | 8.4 | | | | |
| | 5 | 59.6 | 5 | 25.5 | | | | | | |
| | 7 | 55.3 | 7 | 21.2 | | | | | | |
| | 9 | 51 | 9 | 17 | | | | | | |

Taula 3. Possibles combinacions de canals E1 i Ethernet

# 11. Impacte mediambiental del projecte

En primer lloc s'estudiarà el possible impacte sobre les persones i posteriorment es consideraran altres aspectes rellevants com l'impacte visual, la construcció i instal·lació de les infraestructures i el seu manteniment.

## 11.1 Càlcul de la PIRE [31] i distancia de seguretat

El Reial Decret 1066/2001 de 28 de Setembre de 2001 estableix en $10W/m^2$ el límit de densitat màxima de potencia a que pot estar exposat un ser humà en la banda de treball del radioenllaç.

La tipologia de les instal·lacions estudiades al present projecte encaixa en el tipus ER4 [32] de les establertes a les recomanacions de la Secretaria d'Estat de Telecomunicacions per a la presentació de memòries tècniques d'instal·lacions radioelèctriques i per tant, caldrà fer l'estudi pertinent establert al RD 1066/2001.

Aquest estudi ha de servir per calcular, entre d'altres, la distancia de seguretat que ha d'haver entre els elements radiants i les persones que els envolten.

Per calcular la PIRE en W, es tindrà en compte la potencia màxima possible a radiar donada pel fabricant del hardware $P_T = 25dBm$ i el guany d'antena calculat $G_T = 32.16dBi$ de manera que

$$PIRE_{dB} = P_T + G_T = 57{,}16dBm$$

o en watts

$$PIRE = 519{,}99W$$

i la distancia de seguretat $D$ vindrà donada per l'expressió

$$D = \sqrt{\frac{M \cdot PIRE}{4 \cdot \pi \cdot S_{max}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 519{,}99}{4 \cdot \pi \cdot 10}} = 4{,}06m$$

on

$M$ és el factor de reflexió, que pren el valor d'entre 1 si no hi ha reflexió i 4 per una reflexió total del raig (que és el valor més restrictiu i el que s'ha considerat als càlculs).

[31] PIRE. Potencia Isotròpica Radiada Equivalent en cas d'utilitzar una antena omnidireccional.

[32] ER4. Es aquell tipus que inclou les estacions radioelèctriques ubicades en un entorn no urbà amb PIRE equivalent o inferior a 10W i que al seu entorn existeixen àrees en les que habitualment poden haver-hi persones.

$S_{max}$ [33] és la densitat màxima de potencia a que pot estar exposat un ser humà en la banda de treball del radioenllaç.

La conclusió de l'estudi de camp, un cop fet els càlculs teòrics, revela que el compliment de les distancies està garantit en ambdós emplaçaments.

Per una banda, els elements radiants es trobaran instal·lats a les torres de comunicacions, a unes alçades de 22 i 18 metres, de manera que serà del tot impossible l'accés físic a ells sense utilitzar elements especials.

D'una altra banda, no hi ha instal·lacions fixes ni mòbils en la línia de vista (LOS[34]) del radioenllaç, que puguin ser ocupades per persones. Tampoc és possible el trànsit de vehicles en la seva trajectòria, al tractar-se d'emplaçaments aïllats que compten amb barreres físiques que impedeixen l'accés en un perímetre superior al calculat com a distancia de seguretat.

## 11.2 Altres consideracions

- Construcció de la infraestructura.

No es contempla la realització d'activitats d'excavació o construcció que generin sorolls per la operació de maquinaria i equips auxiliars. Tampoc es preveu la generació d'enderrocs d'obra ni l'ús o emmagatzemament de materials de construcció, que generin partícules en suspensió.

- Instal·lació de la infraestructura.

Durant el procés d'instal·lació i manteniment dels elements radiants i l'equipament auxiliar, està prevista la generació de residus inerts que no necessiten cap tipus de tractament especial i que per tant, seran reciclats segons els mètodes comuns establerts per a cada tipus de residu.

- Impacte visual de la instal·lació.

Quant a l'impacte visual del conjunt, el fet de coexistir amb d'altres sistemes ja en funcionament i que les torres de telecomunicacions ja estiguin instal·lades, fa que l'impacte sigui mínim a tots els efectes. Això s'afegeix al fet que el projecte es localitza en un entorn no urbà en el que és força usual trobar construccions d'aquest tipus.

[33] Valor establert al Reial Decret 1066/2001 de 28 de Setembre de 2001
[34] LOS. *Line Of Sight*. Línia de vista.

# 12. Aspectes econòmics

## 12.1 Valoració econòmica

A continuació s'inclou un llistat de hardware necessari, mà d'obra i els seus preus. No es una oferta molt acurada perquè no s'han tingut en compte els descomptes per quantitat.

| Qtat. | Ítem | Referència | Codi | Preu unitat | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | IDU MXE, multiplexor E1 - Ethernet amb cable d'alimentació | UFX_E | 251398141 | 8.669€ | 17.338€ |
| 2 | ODU 7-38GHz | UFB18-1010-01-00 | 251308738 | 2.808€ | 5.616€ |
| 2 | ODU 7-38GHz | UFH18-1010-01-00 | 251308746 | 2.808€ | 5.616€ |
| 2 | Mòdul interfície cable QPSK – 16QAM | UFC_H | 251322704 | 1.052€ | 2.104€ |
| 2 | Kit de connexió: 1 terminal SLF 1+1 SAGEM LINK F PILOT, kit de posada a terra cable (4), kit de posada a terra ODU (2), cinta autovulcanitzant | UFK_S2 | 251383252 | 460€ | 920€ |
| 2 | Antena 17.7GHz – 19.7GHz | PRB220 | 85010092006 | 899€ | 1798€ |
| 2 | Acoblador 1+1 | UFD18C06 | 251396093 | 981€ | 1962€ |
| 2 | Suport tub per 1 ODU | UFP18 | 251396171 | 114€ | 228€ |
| 105 | Cable coaxial Belden 9914 | N/A | N/A | 1.05€ | 110,25€ |
| 8 | Connectors N mascle | ARF1706-ND | 082-340-1052 | 20,63€ | 165,04€ |
| 1 | Petit material d'instal·lació | N/A | N/A | 100€ | 100€ |
| 24 | Mà d'obra operaris especialitzats | Preu/hora | N/A | 28€ | 672€ |
| 696 | Estudi previ, realització del projecte i direcció d'obra. | Preu/hora | N/A | 45€ | 31.320€ |
| **Total pressupost** | | | | | **67.949,29 €** |

Taula 4. Pressupost del projecte

## 12.2 Consideracions del pressupost

Seran necessàries dues ODU diferents per a cada extrem de l'enllaç, ja que treballaran a freqüències diferents en transmissió, en funció de la seva localització. Així, seguint les pautes establertes a la nota UN-69, s'escollirà l'ODU adequada perquè cada extrem de l'enllaç treballi a un dels parells de freqüències detallats a les taules de l'annex 1.

Les antenes escollides responen a les necessitats establertes a l'apartat 6.1.2 i formen part de l'equipament subministrat pel fabricant de l'enllaç. També es podrien acoblar antenes d'altres proveïdors, tenint sempre en compte les recomanacions dels respectius fabricants, però la opció escollida es millor quant a preu i simplicitat d'instal·lació.

S'inclou un tub de suport pel conjunt ODU+antena+acoblador ja que les torres de comunicacions no estan adaptades pel muntatge del hardware de l'enllaç. Aquest es muntarà de manera que no interfereixi amb les antenes existents i de tal manera que faciliti les posteriors operacions de manteniment.

Els costos d'estudi previ, realització del projecte i direcció d'obra, inclouen un programa de formació dels tècnics encarregats de la gestió (és una pràctica habitual en el sector). També s'inclou el manteniment de l'enllaç, el servei postvenda i un servei d'atenció 24/7 durant el primer any de funcionament.

# 13. Conclusions, propostes de futur i escalabilitat del sistema

## 13.1 Conclusions

Per una banda, l'existència de tota una infraestructura prèvia ha condicionat –i també facilitat– el disseny del sistema. El fet de disposar d'un subsistema que genera trames E1, així com la baixa quantitat de dades a transmetre, han determinat l'elecció de la interfície de treball del radioenllaç (PDH), d'entre les diferents opcions ofertes pels fabricants, SDH, PDH i Ethernet.

Per un altra banda, l'elecció del tipus de modulació s'ha fet segons criteris de fiabilitat, es a dir, es tracta d'utilitzar una modulació que compleixi amb els criteris de BER donats pel fabricant segons la sensibilitat del receptor ($-75.5dBm$ per una BER $< 10^{-3}$ per 16QAM). Per tant, s'ha escollit QPSK perquè, tot i que amb 16QAM el nivell de recepció es superior a la sensibilitat del hardware, no es compleixen els criteris de BER ( $2{,}93 \cdot 10^{-2}$) degut als alts nivells de soroll mesurats ($-78dBm$).

L'estudi de soroll en banda i senyals interferents s'ha fet en dues etapes diferents. La primera inclou mesures a les pròpies instal·lacions interferents fetes amb un analitzador d'espectre, per determinar la presencia d'harmònics a la banda de treball del radioenllaç. La segona, amb mesures de camp utilitzant les pròpies antenes de l'enllaç. Totes dues han donat resultats negatius i per tant, el radioenllaç es viable.

Així mateix, la impossibilitat de dur a terme la implementació física per motius de calendari, ha fet necessari un canvi en la planificació original del projecte. Així, s'ha intentat donar una visió aproximada —i cal dir-ho, realista— del procés de muntatge i posada en funcionament del radioenllaç en totes les seves etapes, fent especial incís en el muntatge i configuració del hardware i no tant en la seva interconnexió amb els sistemes existents.

Tots els passos indicats en els capítols 9 i 10, corresponen a les activitats necessàries a realitzar, per entregar a l'usuari final un producte acabat i en estat funcional. No s'ha entrat en detalls d'enginyeria en els muntatges, ja que aquests sempre estan lligats a processos concrets que depenen quasi exclusivament de la direcció d'obra.

Per acabar, s'ha de remarcar que no es preveu el lliurament de cap tipus de manual d'usuari o manteniment, llevat dels proporcionats pel fabricant, ja que el client disposa d'un departament d'explotació tècnica que s'ocupa de dissenyar, planificar i editar els documents interns i els programes de manteniment necessaris.

Si que es lliurarà, però, la preceptiva memòria d'instal·lació revisada i comprovada amb els diagrames i taules de cablejat, que facilitin les posteriors operacions de manteniment, reparació, modificació i/o ampliació del sistema.

## 13.2 Seguiment del cronograma

Quant al seguiment de la planificació i tret de la impossibilitat de dur a terme el muntatge físic, no hi ha hagut problemes importants de calendari. Així, les tasques programades s'han realitzat d'acord al cronograma establert però amb els canvis necessaris, es a dir, dedicant-hi més temps a la part de simulació per pal·liar les mancances de l'etapa de muntatge.

D'altra banda, no s'ha pogut fer l'anàlisi de seguretat del sistema (SSA), ja que bona part d'aquest anàlisi es desenvolupa en les seves fases d'implantació, explotació, transició i manteniment. Per tant, no té sentit intentar demostrar que un sistema assoleix un nivell de risc acceptable, si no s'ha implementat físicament.

La necessitat de dotar el document final d'una estructura clara i ordenada, ha fet necessària la creació de diversos annexes, de manera que s'ha generat una nova tasca a la planificació que inclou la seva redacció. Donat el seu caràcter complementari, es va programar la seva execució en les darreres setmanes del projecte, però en realitat s'ha desenvolupat de manera paral·lela a les altres tasques programades.

## 13.3 Propostes de futur

Un dels motius que van portar a l'autor a escollir aquest TFC, va ser la possibilitat addicional d'utilitzar l'enllaç com a xarxa troncal per a donar accés a diversos emplaçaments aïllats situats en terrenys adjacents.

De fet, aquesta ampliació es considera una continuació natural del projecte, de manera que dona pas a un entorn més complex que interconnecta petites xarxes que actualment treballen via mòdem. Aquestes connexions no son fiables degut a l'elevat soroll del canal de transmissió i la seva vulnerabilitat a agents externs com les mossegades de rosegadors, danys mecànics, etc.

Per tant, es proposa estudiar la connectivitat via WiFi entre el centre de control i 4 instal·lacions aïllades, que permetrà l'intercanvi d'informació i el comandament i control dels equipaments instal·lats, que inclouen els sistemes informàtics i les interfícies de comunicació del hardware específic.

Es dissenyarà una xarxa amb topologia mallada per poder emetre amb la mínima potencia necessària i prescindir de la necessitat d'instal·lar torretes per les antenes. Així, amb una simple antena exterior a la teulada de cada instal·lació, n'hi haurà prou per tenir connectivitat amb el següent emplaçament.

Es faran servir antenes omnidireccionals i s'ajustarà la potencia d'emissió al mínim necessari per poder arribar al següent punt de la xarxa en condicions climatològiques adverses. Com que no es preveu un gran volum de tràfic, no s'han de produir

problemes de transmissió i recepció per manca d'ample de banda. De fet, actualment les dades s'intercanvien a una velocitat màxima de 56Kbps.

A continuació es mostra la simulació d'un possible escenari real.

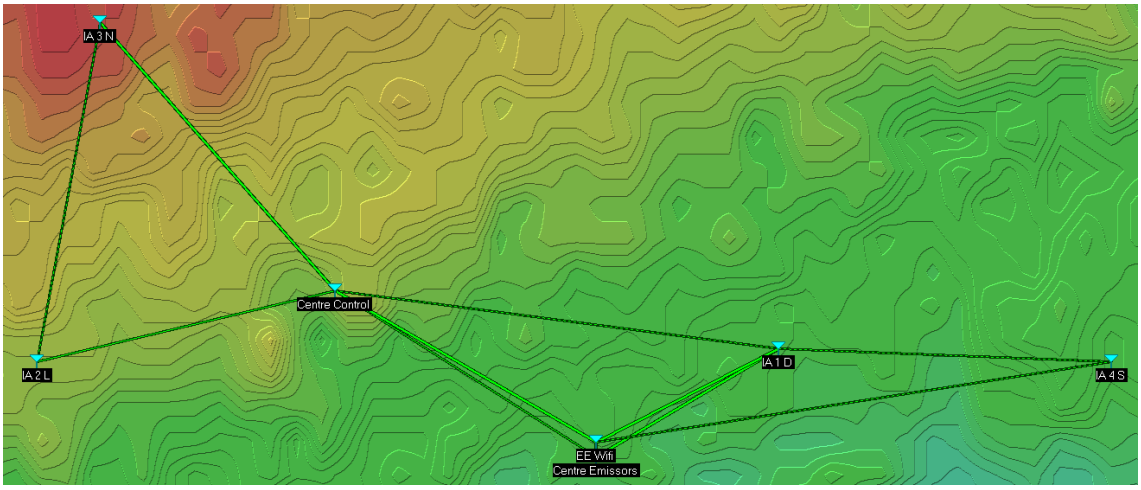



Fig.35. Xarxa mallada entre els diversos emplaçaments

En l'actualitat només es pot accedir remotament via mòdem a les instal·lacions aïllades des del centre de control i aquesta connexió es fa a través de la interfície de comunicacions del hardware dels equips emissors. Per tant, no hi ha comunicació amb els sistemes informàtics locals —tot i que hi ha la possibilitat de connexió via mòdem— i només es pot recollir la informació de monitorització que proporciona l'equip.

La connexió a la xarxa corporativa, permetrà l'administració eficient de la informació de les instal·lacions, com pot ser els registre d'activitats i accessos, el desenvolupament i gestió dels programes de manteniment o l'automatització de presa de paràmetres sense necessitat de desplaçaments.

## 13.4 Escalabilitat del sistema

En la seva configuració inicial, l'enllaç estarà format per un canal E1 més una connexió Ethernet 100Base-T. Si el tràfic Ethernet genera una mitjana de 1Mbps, la càrrega que suportarà el sistema només suposarà una mitjana del 8,6% de la capacitat total [35] del radioenllaç.

En cas d'arribar al límit de la capacitat del sistema, es a dir, 9XE1+Ethernet 100Base-T, hi ha la possibilitat de canviar a modulació 16QAM on es poden utilitzar canals amb un ample de banda de 27,5MHz que a igual nombre de tributaris E1, multipliquen per 3 l'ample de banda del tributari Ethernet (51Mbps).

[35] El radioenllaç suporta un màxim de 9XE1+Ethernet 100Base-T que suposa un tràfic de 35Mbps fent servir modulació QPSK.

En aquest cas, ja s'havia vist anteriorment que el fabricant estableix un llindar de recepció garantit de $-75.5dBm$ amb una BER < $10^{-3}$, però en 16QAM la potencia màxima de transmissió del hardware es redueix a 19dBm.

Si es consulten les taules de BER en funció de $E_b/N_0$, es veu que per una BER < $10^{-3}$ a 16QAM es necessita un quocient d'energies $\geq 10{,}6dB$. Per tant, es pot calcular la SNR (passant primer de $dB$ a lineal) que serà

$$\frac{E_b}{N_0} = 10{,}6dB = 10^{\frac{10.6}{10}} = 11{,}48$$

$$SNR = \left(\frac{E_b}{N_0}\right) \cdot \log_2(16) = 11{,}48 \cdot 4 = 45{,}92\,; \qquad SNR_{dB} = 16{,}62dB$$

Si el soroll del canal en el pitjor cas es de $-78dBm$, el nivell mínim de potencia rebuda serà de

$$P_R min = -78dBm + 16{,}62dB = -61{,}38dBm$$

A continuació es mostra una simulació de Radio Mobile amb les dades del cas.

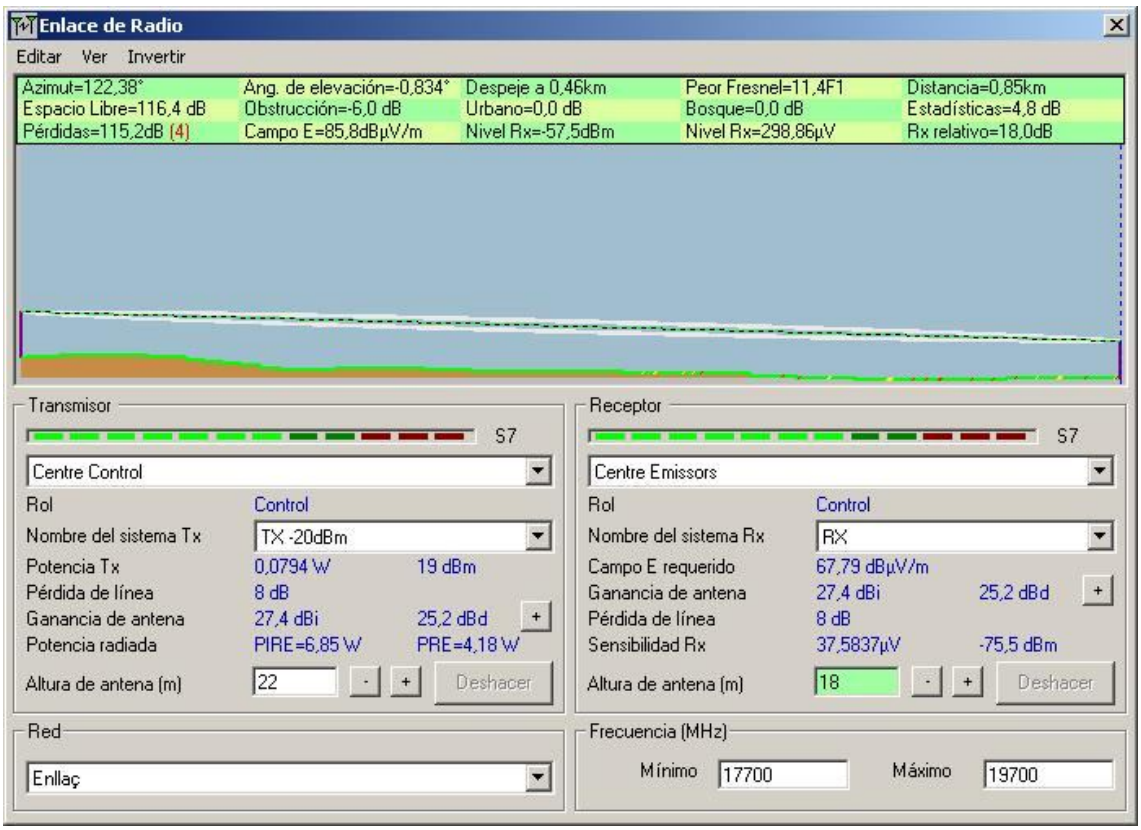



Fig.36. Simulació de l'enllaç amb modulació 16QAM i $P_T = 19dBm$

El nivell de senyal rebut és $3{,}88dBm$ superior al necessari per complir amb els criteris de BER. Tot i això, el marge en recepció serà molt escàs i s'haurà d'avaluar la possibilitat de muntar antenes amb més guany per garantir la fiabilitat del radioenllaç.

# 14. Glossari

**16QAM**. Modulació d'amplitud en quadratura de 16 estats, on cada símbol es codifica amb 4 bits: dos representen la seva component en fase i els altres dos la component en quadratura.

**AFS**. *Aeronautic Fix Service*. Servei fix aeronàutic prestat per sistemes de comunicació entre estacions terrestres fixes.

**AMS**. Servei mòbil aeronàutic.

**ATPC**. Regulació automàtica de la potencia transmesa.

**BER**. *Bit Error Rate*. Nombre de bits erronis respecte del total de bits rebuts en un interval determinat de temps.

**CCITT**. Comitè Consultiu Internacional Telegràfic i Telefònic, en l'actualitat ITU-T.

**dBm**. Mesura de potencia absoluta expressada en forma logarítmica definida com el nivell de potencia en decibels respecte a un nivell de referència d'1mW.

**DEMUX**. Demultiplexor.

**DSP**. *Digital Signal Processor*. Processador de senyal digital.

**E2**. Trama resultant de multiplexar quatre trames E1.

**Ethernet**. Standard de transmissió de dades per xarxes locals basada en el protocol d'accés al medi CSMA/CD. Per més informació consultar l'estàndard IEEE 802.3.

**HSB.** *Hot StandBy*. Configuració en reserva activa.

**ICM**. Mòdul d'interfície de cable.

**IDU**. *InDoor Unit*. Unitat interior del radioenllaç.

**LOS**. *Line Of Sight*. Existeix línia de vista entre dos punts.

**MER**. *Modulation Error Rate*. És una valoració qualitativa que permet determinar com és de bo un senyal modulat digitalment. Es calcula com $MER_{dB} = 10 \cdot log_{10}(P_{senyal}/P_{error})$ on $P_{senyal}$ és la potencia del senyal transmès ideal i $P_{error}$ és la potencia RMS del vector error. Aquest és un vector en el pla I-Q entre el punt ideal de la constel·lació corresponent a un símbol i el punt real on s'ha rebut al desmodular.

**MUX**. Multiplexor.

**NLOS**. *Non Line Of Sight*. No existeix línia de vista entre dos punts.

**ODU**. *OutDoor Unit*. Unitat exterior del radioenllaç.

**PIRE.** Potencia Isotròpica Radiada Equivalent en cas d'utilitzar una antena omnidireccional.

**PCM**. *Pulse Code Modulation*. Procediment de modulació que transforma un senyal analògic en una seqüència de bits.

**PDH**. *Plesiochronous Digital Hierarchy*. Jerarquia digital plesiòcrona que basa el seu funcionament en la multiplexació temporal de senyals.

**QPSK**. *Quadrature Phase Shift Keying*. Modulació per desplaçament de fase de quatre símbols desplaçats 90º entre sí.

**RS232**. Standard per a la connexió sèrie de senyals de dades binaries entre dos equips.

**SNMP**. *Single Network Management Protocol*. Protocol de gestió de xarxa.

**SNR**. Marge de potencia entre la potencia del senyal i el soroll del canal.

**WiFi**. Mecanisme de connexió sense fils entre dispositius electrònics. Els diversos tipus de WiFi es basen en els estàndards IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g i IEEE 802.11n.

# 15. Bibliografia

**Miranda, J.M., Sebastián, J.L., Sierra, M., Margineda, J.** (2001). *Ingeniería de microondas. Técnicas experimentales.* Madrid: Prentice Hall. [107, Cap. 4].

**Herrera, E.** (2004). *Comunicaciones 2. Comunicación digital y ruido*. México D.F.: Grupo Noriega Editores. [161, Ej. 5.9]

**Henne, I., Thorvaldsen, P.** (2002). *Planificació de radioenllaços de visibilitat directa* (2ª edició). Bergen: Nera Networks. [45, sec. 6.1.1]

**Tarrés, F. , Cabrera, M.** (2006). *Modulacions digitals en banda base*. Barcelona: Editorial FUOC. [Cap. 3 i 4].

**Carlson, A. B., Crilly, P., Rutledge, J.** (2001). *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication* (4a. edició). McGraw-Hill.

**Assemblea de Radiocomunicacions de la UIT** (2006). *Disposició de radiocanals per sistemes sense fils fixos que funcionen a la banda de freqüències de 18GHz*. Recomanació UIT-R F.595-9.

**Secretaria d'estat de telecomunicacions i per la societat de la informació** (2012). *Bandes i canalitzacions disponibles en el servei fix de banda ampla, Versió 7.0*. http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/Formularios/Paginas/titulos.aspx. Madrid: Ministeri d'indústria energia i turisme. (Data de consulta: 2/04/2012).

**Satué, A.** (2006). *Comunicacions sense fils*. Barcelona: Editorial FUOC. [26, Sec. 5.1].

***SAGEM* Network Division**. (2004). *SAGEM-LINK F Installation and Operation Manual (June 2004 issue)*. Paris: SAGEM Publications.

**Assemblea de Radiocomunicacions de la UIT** (2005). *Model d'atenuació especifica deguda a la pluja per als mètodes de predicció*. Recomanació UIT-R P.838.3.

**Neri, R.** (2003). *Comunicaciones por satélite.* México D.F.: International Thomson editores , S.A. [263, sec. 5.5]

# Annex 1. Normativa aplicable

## 1. Enllaços punt a punt. Nota UN-69

La banda de freqüències de 18GHz es destina a radioenllaços punt a punt digitals segons la recomanació UIT-R 595-9. Segons aquesta recomanació, a Espanya es pot disposar de 7, 15 o 35 radiocanals bidireccionals per obtenir unes capacitats de 280 Mbps, 140 Mbps o 34Mbps en funció de la modulació utilitzada.

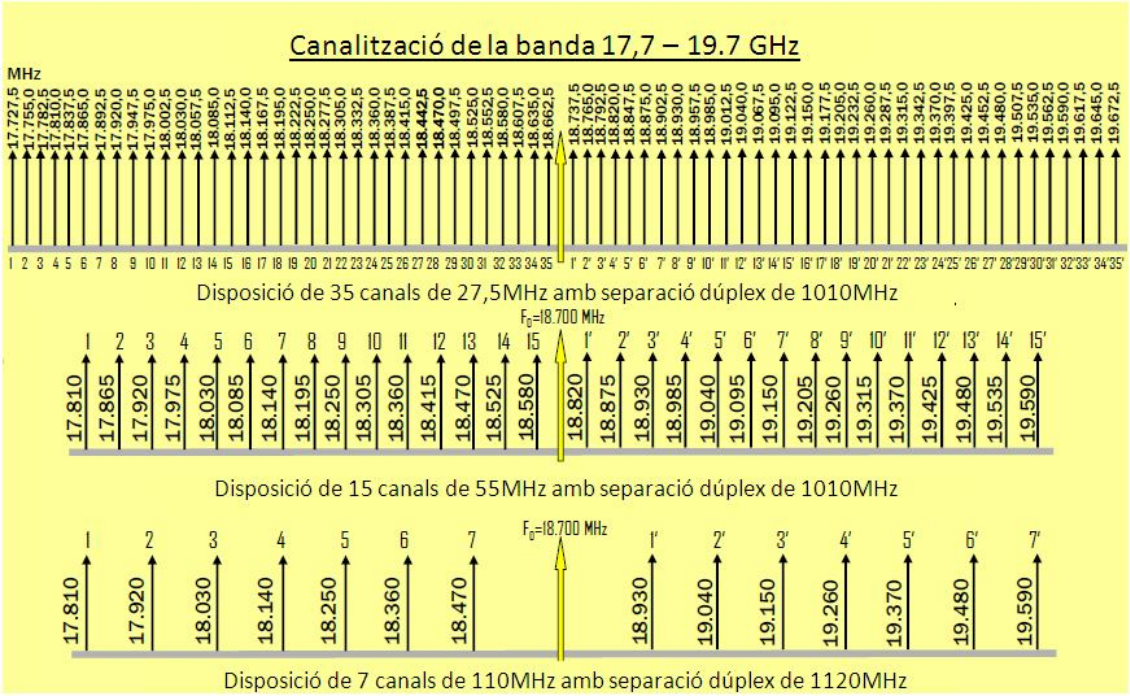



Fig.37 Canalització de la banda 18GHz

També existeix la possibilitat d'utilitzar canals amb pas de canalització de 13.5 i 7MHz a la porció de banda 18,585-18,680GHz emparellada amb 19,595-19,690GHz d'acord amb la figura següent.

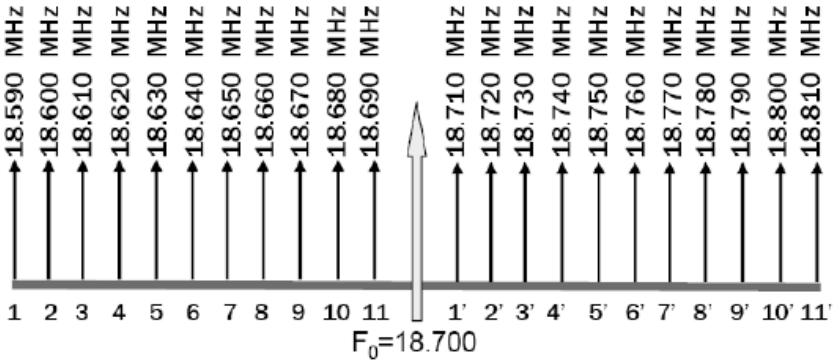



Fig.38 Banda central 18GHz

## 2. Llicència. Títol habilitant

Els projectes de telecomunicacions en banda llicenciada requereixen la sol·licitud d'un títol habilitant a la Subdirecció General de Planificació i Gestió de l'Espectre Radioelèctric depenent del Ministeri d'Indústria. Aquesta subdirecció emetrà el títol corresponent en el que entre d'altres, s'especificarà la potència d'emissió autoritzada, que sempre serà la mínima necessària per complir amb les necessitats del servei. També s'assignaran els canals a utilitzar (de dos en dos per enllaços bidireccionals), atenent a agrupacions ja existents a la mateixa zona.

La normativa pels radioenllaços PaP dona unes recomanacions sobre la distancia que separa els equips i la freqüència a utilitzar:

| Alta capacitat → Canalització > $14MHz$ | |
|---|---|
| 0 – 5 $km$ | Bandes de $f \geq 26GHz$ |
| 5 – 15 $km$ | Bandes de 23 $i$ $18GHz$ |
| 15 – 35 $km$ | Bandes de 15 $i$ $13GHz$ |
| > 35 $km$ | Bandes de $f < 13GHz$ |

Taula 5. Freqüència de treball dels radioenllaços en funció de la distància

En aquest projecte s'ha escollit la banda de $18GHz$ per poder adaptar el sistema en cas que es requereixi la modificació de l'emplaçament de qualsevol de les instal·lacions. Altrament i en funció de la distancia, caldria haver escollit una freqüència $\geq 26GHz$.

L'aplicació IdeSemibanda permet determinar la semibanda de transmissió que es podrà assignar a una instal·lació determinada en funció de les seves coordenades en sistema de referència $ED50$, per una freqüència donada. Es mostra a continuació la consulta feta amb les coordenades de la instal·lació projectada.

Fig.39 Aplicació IdeSemibanda

# Annex 2. Tecnologia PDH

En aquest annex es farà una breu explicació de la tecnologia PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) que s'aplica al present projecte, es a dir, l'europea. Cal dir però, que hi ha tres tipus de PDH: l'europea , la japonesa i l'americana. Es prestarà especial atenció al primer nivell jeràrquic, E1, ja que un dels tributaris del radioenllaç segueix aquest estàndard.

PDH es basa en la multiplexació de canals de 64Kbps. El primer nivell jeràrquic E1, s'obté multiplexant 32 canals i genera un flux TDM a 2048Kbps. Posteriorment es poden multiplexar 4 trames E1 per obtenir el nivell E2, amb una velocitat de transmissió de 8448Kbps i així successivament fins al nivell E5 (564,992Mbps) que s'ha definit per aplicacions amb interfícies de fibra òptica.

A continuació es mostra l'estructura d'una multitrama E1.

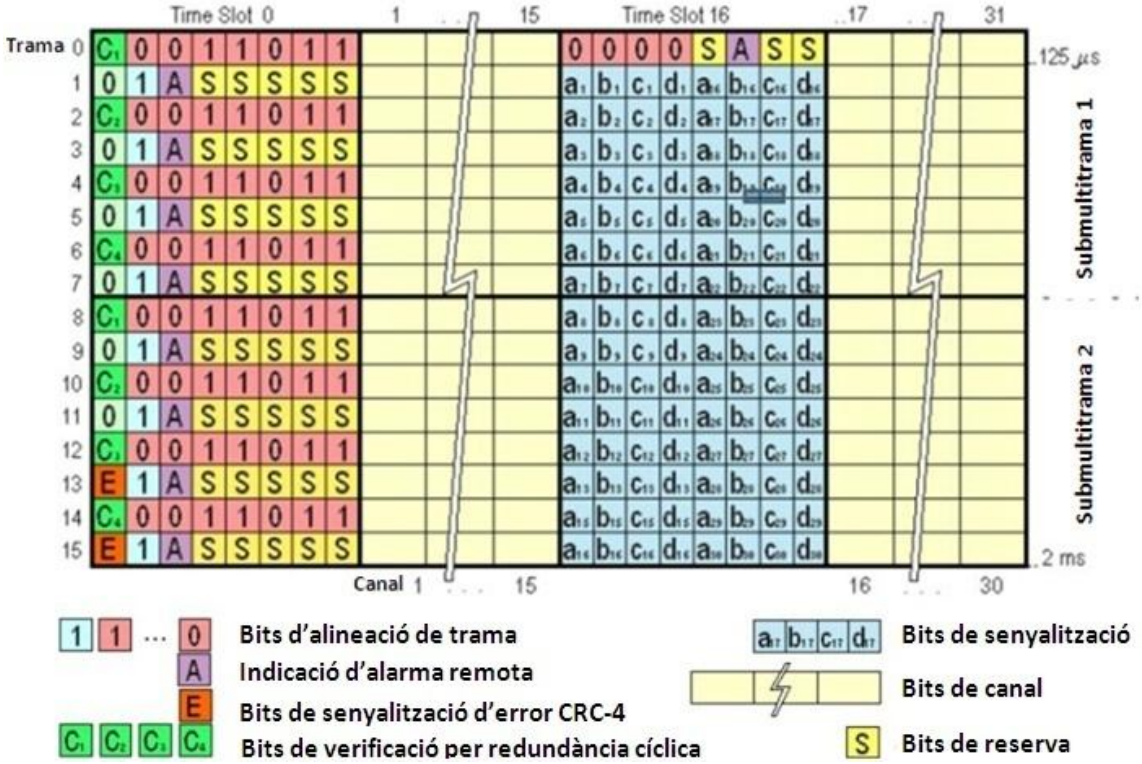


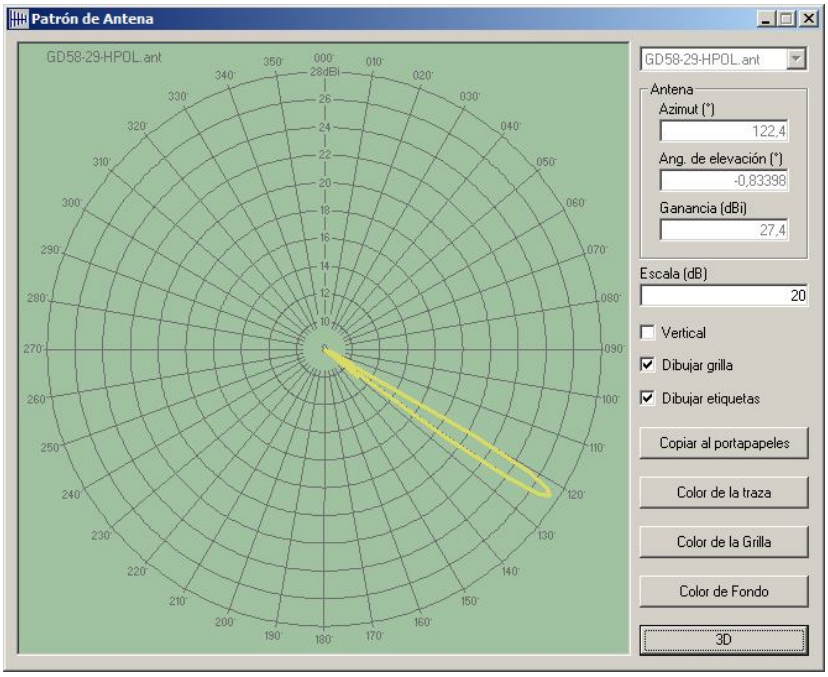

Fig.40 Estructura trama E1

En mode normal, l'slot 0 es reserva per tasques de sincronització i transport d'alarmes encara que, opcionalment, també es preveu la possibilitat d'utilitzar-lo per correcció d'errors amb un codi CRC de 4 bits. L'slot 16 es reserva per tasques de senyalització: associada al canal, per l'establiment o finalització de la comunicació i senyalització per canal comú en que s'utilitza per transmetre missatges d'establiment, control i terminació per qualsevol canal.

# Annex 3. Patró de radiació d'antena utilitzat a les simulacions

Per totes les simulacions fetes amb el programari Radio Mobile s'ha utilitzat un patró d'antena d'alta directivitat. En definitiva, es tracta d'emular el funcionament real de les antenes utilitzades en els muntatges, amb les característiques facilitades pel fabricant.

A continuació es facilita el patró de l'antena utilitzada a les simulacions pel centre de control, amb els seus paràmetres d'azimut, angle d'elevació i guany.



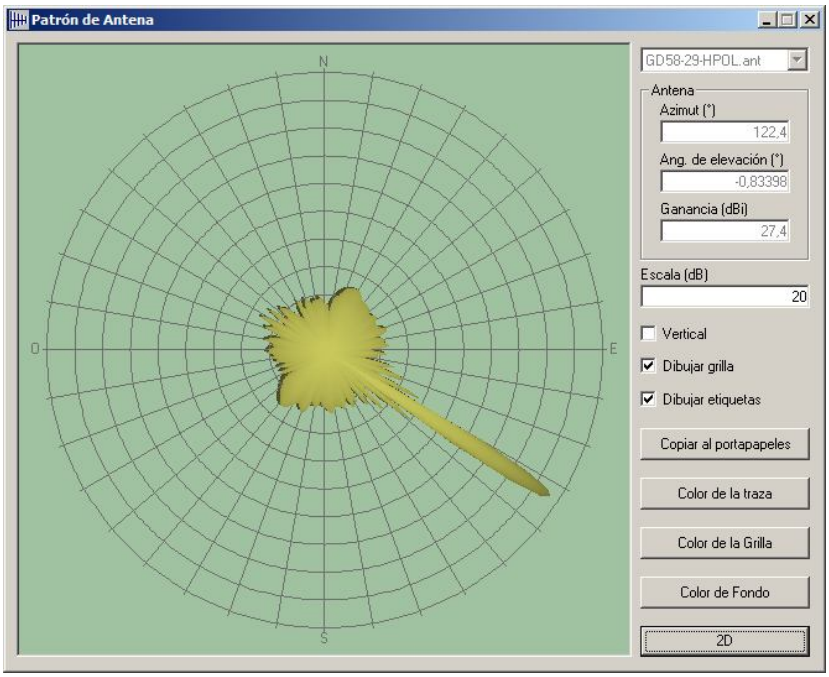




Fig.41 Patró de radiació en 2D i 3D de l'antena utilitzada

# Annex 4. Model de Longley-Rice

Aquest model de propagació, a més de ser un model estadístic, té en compte diversos paràmetres pel càlcul de les pèrdues com poden ser l'alçada mitjana del terreny (ondulació), la refracció a la troposfera, el perfil del terreny, la conductivitat i permitivitat del terreny i les dades climatològiques de l'entorn.

L'algoritme de Longley-Rice treballa en dos modes bàsics: el primer, quan es disposa d'una descripció detallada del perfil del terreny, de manera que es facilita l'obtenció dels paràmetres de propagació. L'altre quan no se'n disposa de les dades i el programa treballa en un mode anomenat "predicció d'àrea". Aquest últim mètode incorpora el factor UF (factor urbà) que té en compte els obstacles normals que es poden trobar en aquests entorns.

Amb l'ús de l'algoritme Longley-Rice, el programa pot predir el nivell de potencia en l'horitzó LOS, fent servir el model de reflexió terrestre de dos raigs.

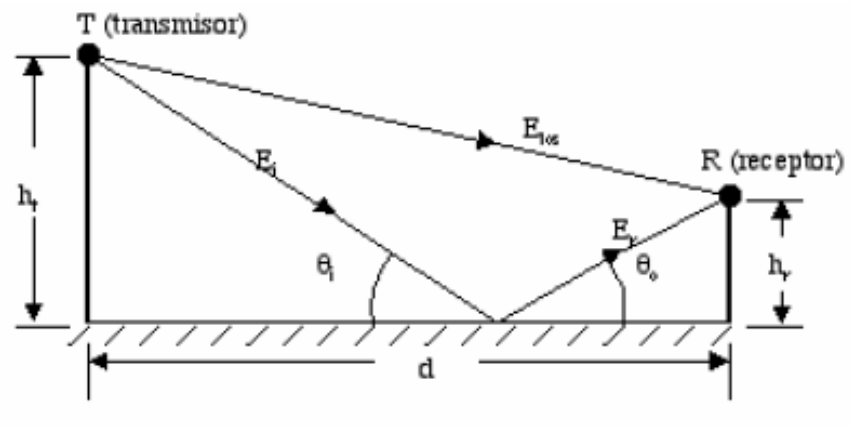



Fig.42 Model de reflexió terrestre de dos raigs

Les pèrdues per difracció per obstacles aïllats, s'estimen segons el mètode Knife-edge[36] de Fresnel-Kirchhoff i les pèrdues per difracció en camp llunyà a distancies del doble de LOS, segons el mètode de Van de Pol-Bremmer modificat.

Finalment, assenyalar que el model de Longley-Rice no preveu cap manera de determinar correccions degudes a factors ambientals en zones properes al receptor, ni per la presencia d'arbres, edificis o altres obstacles, ni tampoc considera l'efecte de la multitrajectòria.

[36] En el cas estudiat en aquest projecte, no s'aplica aquest mètode al no existir obstacles entre els dos extrems del radioenllaç.

# Annex 5. Índex de figures

Fig. 1 Servei Mòbil Aeronàutic (AMS)

Fig. 2 Topografia de l'enllaç

Fig.3 Esquema del sistema de comunicacions de veu

Fig.4 diagrama de blocs del multiplexor de primer ordre

Fig.5 Ports Ethernet de la IDU

Fig.6 Canals de 2Mbps de la IDU

Fig.7 Diagrama de blocs de la IDU amb Ethernet + 2Mbps

Fig.8 Configuració 1+1 HSB

Fig.8 Configuració pràctica 1+1 HSB

Fig.9 Constel·lació i codificació de símbol de la modulació QPSK

Fig.10 Constel·lació i codificació de símbol de la modulació 16QAM

Fig.11 Quocient d'energies $E_s/N_0$ de diferents modulacions

Fig.12 Diagrama de blocs del sistema

Fig.13 Connector DB25 de la IDU per tributaris E1

Fig.14 Diagrama de blocs del muntatge per mesurar espectres.

Fig.15 Ocupació espectral de l'equip 1 en condicions normals de treball

Fig.16 Anàlisi de l'espectre emès per l'equip 1 a la banda de 18GHz

Fig.17 Anàlisi de l'espectre emès per l'equip 2 en condicions normals de treball

Fig.18 Espectre emès per l'equip 2 a la banda de 18GHz

Fig.19 Viabilitat de l'enllaç en sentit Centre de Control a Centre d'Emissors

Fig.20 diagrama de cobertura per la potencia mínima transmesa

Fig.21 Càlcul estadístic de la probabilitat d'error al trajecte

Fig.22 Resultats de la simulació en direcció Centre de Control a Centre d'Emissors

Fig.23 Resultats de la simulació en direcció Centre d'Emissors a Centre de Control

Fig.24 Cobertura de l'enllaç per al pitjor cas, amb una potencia d'emissió de 14dBm

Fig.25 i 25 bis Resultats de la simulació amb una potencia d'emissió de 14dBm

Fig.26 Muntatge de la IDU

Fig.27 Selecció de la polarització

Fig.28 Configuració 1+1 amb acoblador i antena integrada

Fig.29 Orientació correcta de les antenes

Fig.30 Nivell de camp rebut per les antenes
Fig.31 Escombrat de freqüència a la banda de proves
Fig.32 Bucle en un tributari 2Mbps
Fig.33 Programari configuració opció Ethernet
Fig.34 Assignació adreces IP
Fig.35 Xarxa mallada entre els diversos emplaçaments
Fig.36 Simulació enllaç amb modulació 16QAM i $P_T = 19dBm$
Fig.37 Canalització de la banda 18GHz
Fig.38 Banda central 18GHz
Fig.39 Aplicació IdeSemibanda
Fig.40 Estructura trama E1
Fig.41 Patró de radiació d'antena utilitzat, en 2D i 3D
Fig.42 Model de reflexió terrestre de dos raigs

## Annex 6. Índex de taules

Taula 1. Guany de les antenes en funció del seu diàmetre
Taula 2. Pinout del connector DB25 de la IDU per tributaris E1
Taula 3. Possibles combinacions de canals E1 i Ethernet
Taula 4. Pressupost
Taula 5. Freqüència de treball dels radioenllaços en funció de la distància

# Annex 7. *Datasheets* dels equipaments

sagem

## SAGEM LINK F

### DIGITAL RADIO RELAY SYSTEM

- Ethernet interface : GE and FE with QoS
- PDH interfaces : E1, E3
- SDH intertaces : STM1
- Flexible and modular architecture with ODU compatible for all configurations and capacities

# SAGEM LINK F : DIGITAL RADIO RELAY SYSTEM

**SAGEM-LINK F is a digital radio relay system designed to meet the needs of a continuously evolving networks market and guarantees quality and reliability for short and medium distance point-to-point links. SAGEM LINK F enables rapid and cost-effective connectivity for carriers, both in the cellular and fixed operator markets, but also for private networks and enterprises.**

SAGEM LINK F consists of :

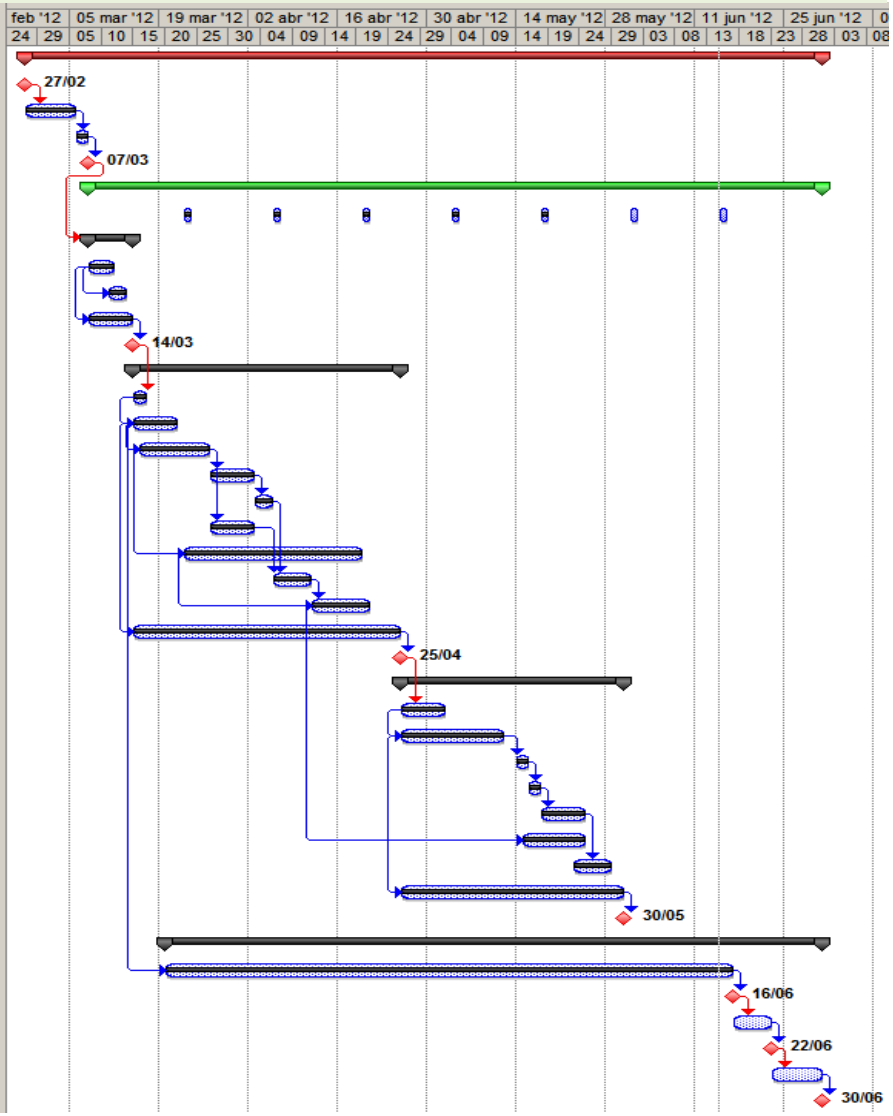
- SAGEM LINK F-N for low to medium capacity application. It offers the possibility to multiplex several E1 and a FE interface and to configure the capacity and the number of E1 by software.
- SAGEM LINK F-H for medium to high capacity application (up to 900 Mbps in 2+0). SAGEM LINK-H multiplexes several E1 and an innovative GE interface. Thanks to an integrated Ethernet switch, with advanced quality of service, 4 Ethernet ports, and a large number of E1 multiplexer (up to 80 E1 software programmable), this product is particularly adapted to follow the migration from 2G to 3G and LTE, but also allows connectivity of different services: 2G, 3G, Wimax, digital TV
- SAGEM LINK F-A for SDH application. It allows transporting 1or 2 STM1 in a single channel and the double in 2+0 configuration.
- Same ODU for all applications and capacity (PDH, SDH and Ethernet) reducing OPEX when total capacity of the network shall be increased.

## TECHNICAL FEATURES

- Very compact OutDoor Unit (ODU) compatible for all configurations (1+0 and 1+1), all capacities
- Same InDoor Unit (IDU) for all frequency bands
- Ethernet throughput and number of E1 fully programmable with the SAGEM LINK PILOT software
- Ethernet switch compliant with MEF standard
- Efficient modulation : QPSK to 256QAM associated to Adaptive Modulation
- Adaptive modulation algorithm selects the best modulation according to the condition of propagation. This feature allows reducing CAPEX using smaller antenna and improving availability of Ethernet link
- High Tx Power allows to reduce cost of link using smaller antennas
- XPIC algorithm allows to double the capacity in a same channel bandwidth
- ATPC (Automatic Transmit Power Control) with large dynamic of Tx power eliminates the need for fixed attenuators and allows to reduce the level of interferer
- The impedance of the E1 tributaries can be set to either 75 or 120 Ohm by the software
- IONOS NMS is a common management platform for all transmission equipment from SAGEM (Radio, Copper and Optic)
- Speed and ease of installation Thanks to the user-friendly software SAGEM LINK PILOT, and the integrated installation tools, such as analysis of received spectrum, the installation and commissioning of the link are easier, and at the same time link availability is improved and operational cost are minimised
- The low power consumption of SAGEM LINK F terminals and the compactness of the IDU enable the integration in a majority of BTSs and Node B
- Standard SNMP Network Management Interface allows SAGEM LINK F to be managed by an external Network Management System

All rights reserved. The information and specifications included are subject to change without prior notice. Sagem Communications tries to ensure that all information in this document is correct, but does not accept liability for error or omission. Non contractual document. All trademarks are registered by their respective owners. Simplified joint stock company - Capital 158.291.895 Euro - 440 294 510 RCS Nanterre - SAGEM is a registered brand from Safran Group. 09/2009

Sagem Communications SAS
Energy & Telecom Business Unit
Headquarters : 250, route de l'Empereur
92500 Rueil-Malmaison - FRANCE
Tel : +33 1 57 61 10 00 - Fax : +33 1 57 61 10 01
www.sagem-communications.com

# Annex 8. Diagrama de Gantt

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **TFC** | **95 días** | **lun 27/02/12** | **sáb 30/06/12** |
| 2 | Inici del projecte | 0 días | lun 27/02/12 | lun 27/02/12 |
| 3 | Recerca informació temàtica TFC | 6 días | lun 27/02/12 | lun 05/03/12 |
| 4 | Elaboració document de proposta | 2 días | mar 06/03/12 | mié 07/03/12 |
| 5 | Lliurament proposta TFC | 0 días | mié 07/03/12 | mié 07/03/12 |
| 6 | **DESENVOLUPAMENT DEL PROJECTE** | **87 días** | **jue 08/03/12** | **sáb 30/06/12** |
| 7 | **Seguiment amb al consultor** | **61 días** | **vie 23/03/12** | **vie 15/06/12** |
| 15 | **Planificació del projecte** | **6 días** | **jue 08/03/12** | **mié 14/03/12** |
| 16 | Recerca d'informació general i definició de l'abast de | 3 días | jue 08/03/12 | dom 11/03/12 |
| 17 | Determinació de les tasques a realitzar i la seva dur: | 3 días | dom 11/03/12 | mar 13/03/12 |
| 18 | Redacció documentació pel lliurament | 6 días | jue 08/03/12 | mié 14/03/12 |
| 19 | Lliurament de la planficació del treball (PAC1) | 0 días | mié 14/03/12 | mié 14/03/12 |
| 20 | **Primera part. Anàlisi, disseny i càlculs** | **30 días** | **jue 15/03/12** | **mié 25/04/12** |
| 21 | Introducció al projecte | 2 días | jue 15/03/12 | vie 16/03/12 |
| 22 | Anàlisi de necessitats | 5 días | jue 15/03/12 | mié 21/03/12 |
| 23 | Estudi de les instal•lacions existents | 7 días | vie 16/03/12 | lun 26/03/12 |
| 24 | Cerca i elecció del hardware necessari per a la impl | 5 días | mar 27/03/12 | lun 02/04/12 |
| 25 | Estudi del tipus de modulació i freqüència a emprar | 3 días | mar 03/04/12 | jue 05/04/12 |
| 26 | Anàlisi dels tributaris i la possibilitat d'integració en | 5 días | mar 27/03/12 | lun 02/04/12 |
| 27 | Disseny del sistema i possible connexionat amb el | 20 días | vie 23/03/12 | jue 19/04/12 |
| 28 | Càlcul de potencies d'emissió necessàries, atenua | 4 días | vie 06/04/12 | mié 11/04/12 |
| 29 | Interferències amb altres sistemes en funcionament | 7 días | jue 12/04/12 | vie 20/04/12 |
| 30 | Redacció documentació pel lliurament | 30 días | jue 15/03/12 | mié 25/04/12 |
| 31 | Primer lliurament del projecte (PAC2) | 0 días | mié 25/04/12 | mié 25/04/12 |
| 32 | **Segona part. Simulació, muntatge i posada en servei** | **25 días** | **jue 26/04/12** | **mié 30/05/12** |
| 33 | Simulació per software | 5 días | jue 26/04/12 | mié 02/05/12 |
| 34 | Muntatge i configuració del hardware | 12 días | jue 26/04/12 | vie 11/05/12 |
| 35 | Aspectes econòmics | 2 días | lun 14/05/12 | mar 15/05/12 |
| 36 | Impacte mediambiental del projecte | 2 días | mié 16/05/12 | jue 17/05/12 |
| 37 | Posada en explotació del enllaç | 5 días | vie 18/05/12 | jue 24/05/12 |
| 38 | Redacció annexes, glossari i bibliografia | 8 días | mar 15/05/12 | jue 24/05/12 |
| 39 | Conclusions, propostes de futur i escalabilitat del si: | 4 días | mié 23/05/12 | lun 28/05/12 |
| 40 | Redacció documentació pel lliurament | 25 días | jue 26/04/12 | mié 30/05/12 |
| 41 | Segon lliurament del projecte (PAC3) | 0 días | mié 30/05/12 | mié 30/05/12 |
| 42 | **Tercera part. Lliurament del projecte** | **78 días** | **mar 20/03/12** | **sáb 30/06/12** |
| 43 | Redacció final de la memòria | 65 días | mar 20/03/12 | sáb 16/06/12 |
| 44 | Lliurament de la memòria | 0 días | sáb 16/06/12 | sáb 16/06/12 |
| 45 | Elaboració de la presentació | 6 días | dom 17/06/12 | vie 22/06/12 |
| 46 | Lliurament de la presentació | 0 días | vie 22/06/12 | vie 22/06/12 |
| 47 | Tribunal TFC | 7 días | sáb 23/06/12 | sáb 30/06/12 |
| 48 | Final tribunal i projecte | 0 días | sáb 30/06/12 | sáb 30/06/12 |