



## **TESIS DE MAESTRÍA**

**Sistema de Telecomunicaciones para el proyecto AMIGA  
perteneciente al observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger**

**por Pablo Gabriel Fiszlelew**

Ingeniero Electrónico (2001), Universidad de Buenos Aires

Presentado a la Escuela de Posgrado del ITBA  
en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de

**Maestría en Ingeniería de las Telecomunicaciones**

en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Firma del Autor \_\_\_\_\_, 6 de agosto de 2015  
Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Certificado por \_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Platino (Tutor de la Tesis)  
Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Aceptado por \_\_\_\_\_  
Rubén Kustra (Director de Carrera)  
Instituto Tecnológico de Buenos Aires

## **Miembros del Jurado:**

Ing. Hugo César Pérez

---

Ing. Leandro Santi

---

Ing. Arsenio Roberto Sánchez

---

## **Agradecimientos:**

A mi mujer Estrella de quien siempre obtuve su apoyo incondicional, no sólo me acompañó durante mi viaje a Malargüe sino que lo hizo durante todas las horas, días, semanas, meses y años que me llevó desarrollar esta tesis, alentándome en todo momento a finalizarla. Por eso, siento que de alguna manera ella es parte de esta tesis, y le estaré por siempre agradecido.

A mis padres quienes me formaron en la vida y siempre me incentivaron al estudio, lo cual me pone muy orgulloso de ellos.

A mi tutor Manuel Platino quien me dio la invaluable oportunidad de integrarme al equipo de profesionales del ITeDA (Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas), y que me guió durante todo el proceso de la tesis.

A Ivan Sidelnik quien se ocupó de hacerme el contacto en ITeDA. Sin su contribución esta tesis no hubiese sido posible.

Finalmente a la memoria del gran físico que fue Pierre Victor Auger y del gran divulgador científico que fue Carl Sagan, quien despertó mi interés por la astronomía durante mi infancia.

# Índice de contenido

CAPITULO 1: Introducción.....	7
Rayos cósmicos y el observatorio Pierre Auger.....	7
Descripción del proyecto AMIGA.....	12
Requerimientos de AMIGA para el sistema de telecomunicaciones.....	15
Cálculo del throughput del tráfico de T2.....	17
Cálculo del throughput del tráfico de T3.....	18
Cálculo del throughput total de AMIGA.....	18
Máxima tasa de error tolerada.....	18
Presupuesto energético.....	18
Objetivos de trabajo.....	19
CAPITULO 2: Análisis del sistema propuesto.....	20
Sistema de telecomunicaciones propuesto originalmente.....	20
Determinación de si el modelo propuesto satisface o no las necesidades del sistema de comunicaciones requerido por AMIGA.....	22
Análisis de los tiempos involucrados en una comunicación completa.....	23
Medición de los tiempos de procesamiento de CPU.....	23
Cálculo de los tiempos por los circuitos serie (RS232).....	27
Cálculo de los tiempos por radiofrecuencia (RF) basado en el estándar IEEE 802.15.4.....	29
Cálculo de los tiempos totales y tasa real de transferencia por suscriptor.....	39
Resultados.....	40
Conclusión.....	44
CAPITULO 3: Sistema alternativo.....	45
Utilización del espectro de frecuencia.....	45
Equipos seleccionados.....	46
Potencia conducida de cresta máxima del transmisor.....	47
Configuración de la red.....	47
CAPITULO 4: Cálculo de los radioenlaces.....	49
Esquema de conexión.....	49

Cálculo de línea de vista y zona de Fresnel.....	53
Conclusiones teóricas.....	59
CAPITULO 5: Pruebas y mediciones de campo.....	60
Alineación de antenas.....	60
Frame Aggregation.....	61
Prueba de tasa máxima de transferencia.....	62
Prueba de tasa de errores o paquetes perdidos.....	65
Simulador del tráfico real.....	70
CAPITULO 6: Pruebas y mediciones adicionales.....	76
Prueba de relación señal a ruido.....	77
Prueba de tasa de transferencia.....	78
Pruebas de pérdida de datos y tasa de paquetes con error.....	79
Prueba de consumo de energía.....	80
Prueba de uptime.....	80
Prueba de coordinador de red y su efecto en pérdida de datos.....	80
CAPITULO 7: Conclusiones.....	84
Referencias.....	85
Apéndice A - AMIGA at the Auger observatory: the telecommunications system.....	87
Apéndice B - Especificaciones técnicas del Rocket M2.....	90
Apéndice C - Especificaciones técnicas del AirGrid M2.....	93
Apéndice D - Resolución de la Secretaría de Comunicaciones 302/1998.....	95
Apéndice E - Configuración del equipo Rocket M2:.....	104
AirMax.....	104
Sección Main:.....	105
Sección Wireless:.....	106
Sección Network:.....	107
Sección Advanced:.....	109
Sección Services:.....	110
Sección System:.....	111
Apéndice F - Configuración del equipo Ubiquiti AirGrid M2.....	112
Sección Main:.....	112
Sección Wireless:.....	113

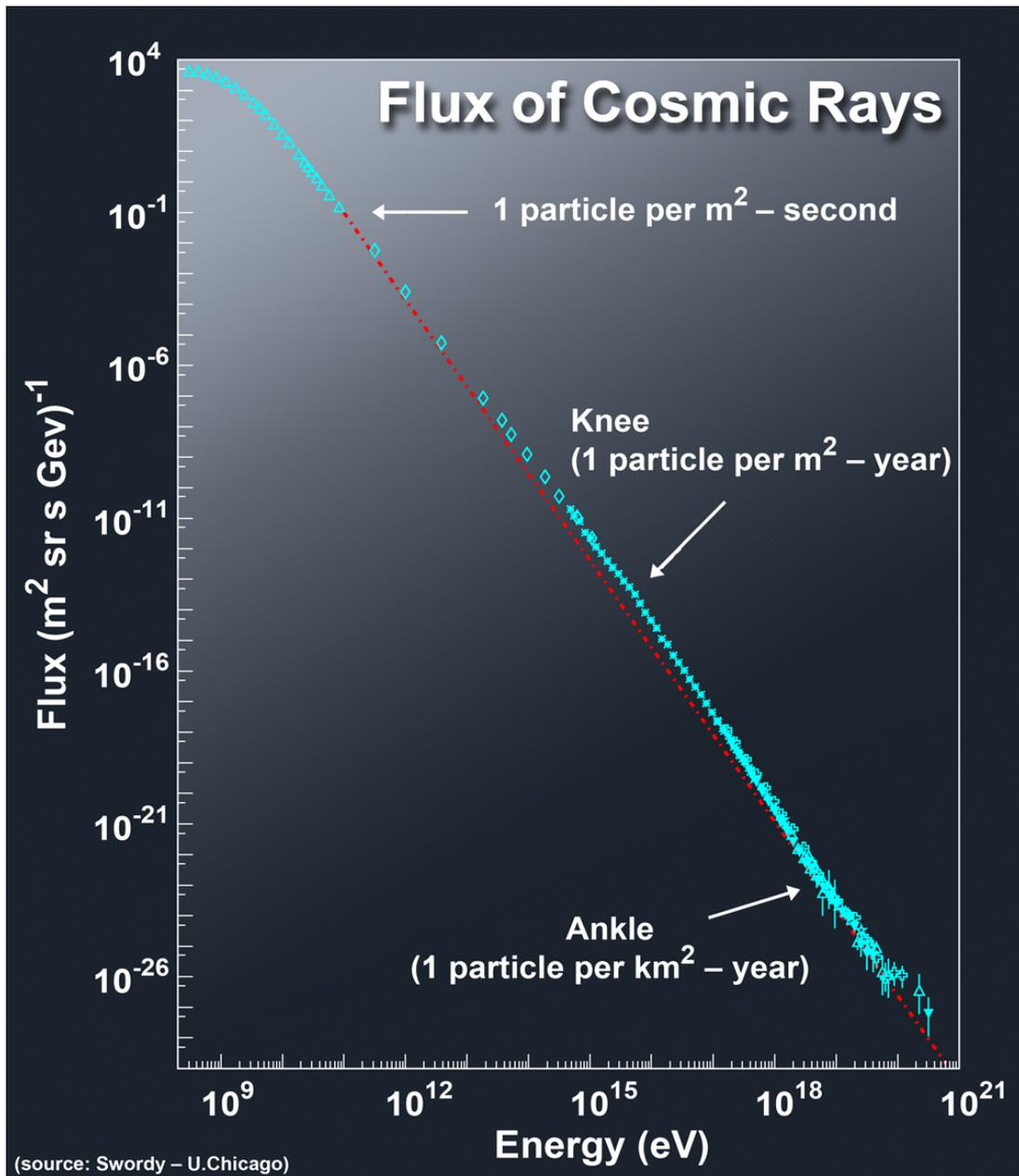
Sección Network:.....114  
Sección Advanced:.....115  
Sección Services:.....116  
Sección System:.....117

## *CAPITULO 1: Introducción*

### *Rayos cósmicos y el observatorio Pierre Auger*

Los rayos cósmicos son mayoritariamente partículas subatómicas cargadas que llegan a nuestro planeta con un espectro de energía que cubre varios órdenes de magnitud, desde  $10^9$  eV hasta  $\gg 10^{20}$  eV. Después de casi 100 años del descubrimiento de los rayos cósmicos todavía existen grandes incógnitas acerca de su origen. Si bien no hay evidencias directas, se cree que los de más bajas energías se originan en nuestra Galaxia mientras que los de energías más altas son de origen extragaláctico. A qué energía se da la transición entre las dos componentes y de qué manera continúa el flujo a las energías más altas son todavía una incógnita.

El flujo diferencial de rayos cósmicos sigue aproximadamente una ley de potencia  $\text{Energía}^{-3}$  [Figura 1.1], yendo desde algunos cientos por  $\text{m}^2$  por segundo para bajas energías ( $\sim 10^9$  eV), hasta sólo unos pocos por  $\text{km}^2$  por siglo para los rayos cósmicos de energías ultra elevadas ( $\sim 10^{20}$  eV).



**Figura 1.1:** Espectro de rayos cósmicos

**Fuente:** Helmholtz Alliance for Astroparticle Physics (HAP)

El objetivo general del proyecto Pierre Auger [Ref.01] es determinar la naturaleza, energía y lugar de origen de las partículas con mayor concentración de energía conocida, los rayos cósmicos de ultra alta energía (energías superiores a los  $10^{18}$  eV), para comprender mejor el universo que nos rodea.

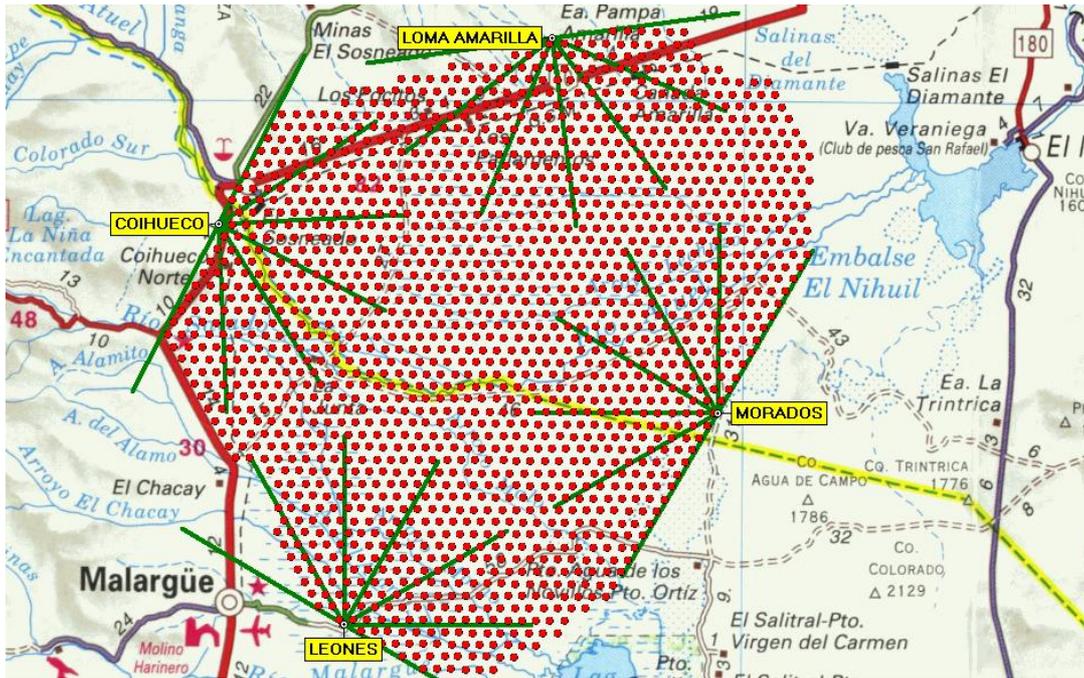
Alrededor de 500 científicos de casi 100 instituciones de 18 países participan en este desafío científico que propone el Observatorio Pierre Auger. Los países participantes son: Alemania, Argentina, Australia, Brasil, Croacia, Eslovenia, España, Estados Unidos, Francia, Italia, México, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía y Vietnam.

Básicamente, el observatorio Pierre Auger ha sido concebido para estudiar los rayos cósmicos de altas energías (que van de los  $3 \times 10^{18}$  eV a los  $6 \times 10^{19}$  eV) que llegan del espacio exterior e impactan con las capas superiores de la atmósfera, generando así como subproducto una cascada o lluvias de partículas que llegan hasta la superficie de la tierra. Estas lluvias producto de la colisión tienen dos componentes fundamentales: la electromagnética (electrones y gamas) y la muónica (muones).

Los principales resultados del observatorio Pierre Auger están orientados a conocer la composición química de los rayos cósmicos, su energía, así como también la dirección de proveniencia.

El Observatorio Pierre Auger está emplazado en el hemisferio sur, más específicamente en Pampa Amarilla perteneciente a los departamentos de Malargüe y San Rafael de la provincia de Mendoza, República Argentina.

Por un lado el observatorio consta de 1600 detectores de superficie basados en el efecto de radiación Cherenkov en agua [Ref.02], distribuidos en una grilla triangular y distanciados a 1,5 km entre sí, cubriendo una superficie total de 3000 km<sup>2</sup> [Figura 1.2]. Estos detectores de superficie están operativos todo el tiempo, o sea que tienen un duty-cycle de 100%.



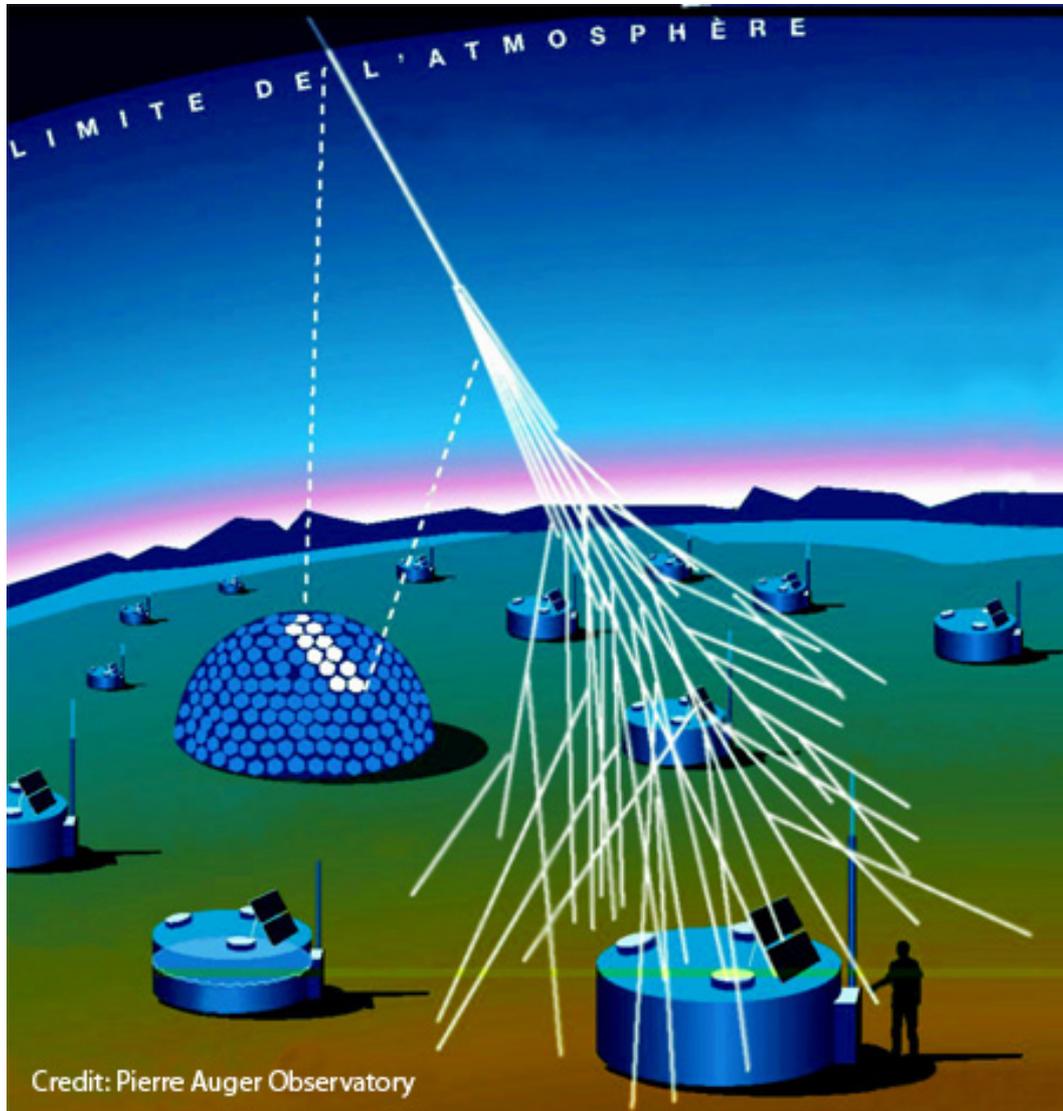
**Figura 1.2:** Mapa del Observatorio Pierre Auger

**Fuente:** Observatorio Pierre Auger

Por otro lado estos detectores de superficie se complementan con un conjunto de 24 telescopios de fluorescencia de alta sensibilidad [Ref.03], agrupados en unidades de 6 en 4 sitios en la periferia del arreglo de detectores de superficie, cada uno con campo visual de  $30^\circ$  de elevación y  $30^\circ$  de azimut. Estos telescopios de fluorescencia, observan la atmósfera para detectar la tenue luz ultravioleta que producen las cascadas de rayos cósmicos al atravesar el aire. Más específicamente lo que se detecta es la luz de fluorescencia del nitrógeno atmosférico, producida por los electrones de la lluvia de partículas a partir del impacto del rayo cósmico en la atmósfera terrestre. Estos telescopios ópticos tienen un duty-cycle de entre el 10% y 15% del tiempo, ya que únicamente están operativos en las noches despejadas y sin luna.

Utilizando los datos obtenidos tanto de los detectores de superficie como de los telescopios ópticos en simulaciones de computación es posible reconstruir la energía del rayo cósmico primario, su composición química y su dirección de impacto. Este método de obtención de datos del mismo fenómeno utilizando 2 técnicas diferentes conforma lo que se denomina un sistema híbrido de detección [Figura 1.3],

permitiendo así extender hacia abajo el límite de energía de los rayos cósmicos desde  $3 \times 10^{18}$  eV hasta  $10^{18}$  eV.



**Figura 1.3:** Esquema de sistema híbrido de detección por medio de telescopios de fluorescencia y detectores de superficie de efecto Cherenkov.

**Fuente:** Observatorio Pierre Auger

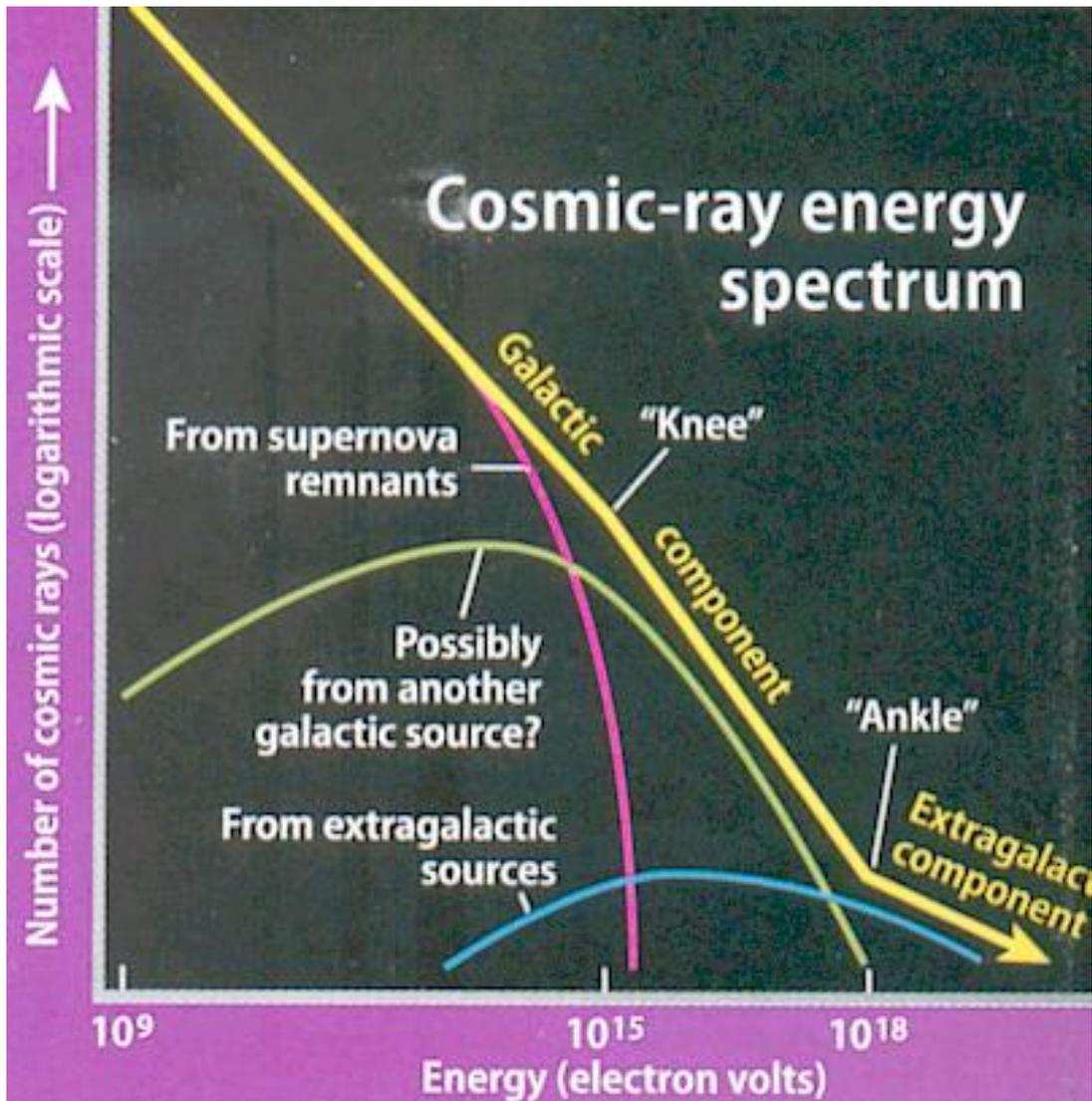
## ***Descripción del proyecto AMIGA***

De acuerdo al diseño de base del observatorio Pierre Auger descrito anteriormente, la grilla de detectores de superficie es completamente eficiente para la detección de rayos cósmicos con energías por encima de  $3 \times 10^{18}$  eV, y en el modo híbrido (o sea agregando los telescopios de fluorescencia) este rango se extiende a partir de  $10^{18}$  eV. Esto no es suficiente para estudiar la zona del espectro en donde se cree que se produce la transición de Fuente de rayos cósmicos con origen galáctico a rayos cósmicos con origen extragaláctico.

Para bajar este límite, el observatorio Pierre Auger introdujo 2 proyectos de mejora: AMIGA (“Auger Muons and Infill for the Ground Array”) [Ref.04] [Ref.05] [Ref.06] [Ref.07] y HEAT (“High Elevation Auger Telescopes”) [Ref.08] [Ref.09].

El proyecto AMIGA está formado por una colaboración internacional que incluye a Alemania, Argentina, España, Italia, México, y Polonia y tiene como objetivo mejorar el estudio de la composición química de los rayos cósmicos de las lluvias medidas por el observatorio por medio del conocimiento de la componente muónica de la lluvia de partículas. Este objetivo es fundamental para el avance del conocimiento científico en la rama de la física de rayos cósmicos.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, otro objetivo es disminuir el límite inferior de energía de los rayos cósmicos estudiados. De esta manera, se incorpora el estudio de los rayos cósmicos en la zona del espectro donde se cree se produce el cambio de Fuente de galácticas (energías hasta  $10^{17}$  eV) a extragalácticas (energías superiores a  $10^{19}$  eV) **[Figura 1.4]**.



**Figura 1.4:** Espectro de energía de rayos cósmicos con origen galáctico y extragaláctico

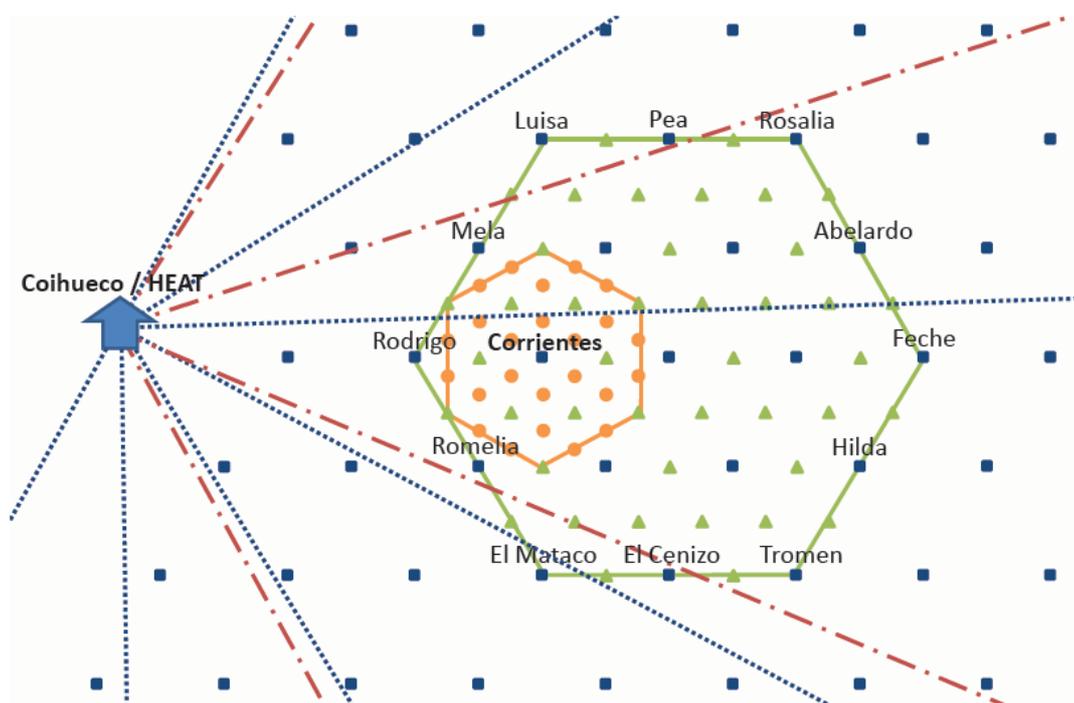
**Fuente:** <http://universe-review.ca/>

Además de los detectores de superficie y de los telescopios ópticos que utiliza el observatorio Pierre Auger, con este proyecto se están incorporando un tercer tipo de detectores: los contadores de muones.

AMIGA solamente cubre un área pequeña de  $23.5 \text{ km}^2$ , ya que el flujo de rayos cósmicos aumenta rápidamente a medida que baja la energía de los mismos (tal como vimos en la **Figura 1.1**). Por otro lado, los detectores de AMIGA se distribuyen con

menor espaciado entre sí en un arreglo más denso que el arreglo principal de Pierre Auger, ya que energías mas bajas implican una huella de lluvia de partículas más pequeña. Bajo este marco AMIGA consta de un arreglo de 61 pares de detectores distanciados 750 metros uno de otro, más 24 pares de detectores extra distanciados 433 metros uno del otro.

A este arreglo más denso de 85 pares de detectores emplazados dentro del arreglo principal que conforma Pierre Auger, se lo denomina “Infill” [Figura 1.5].

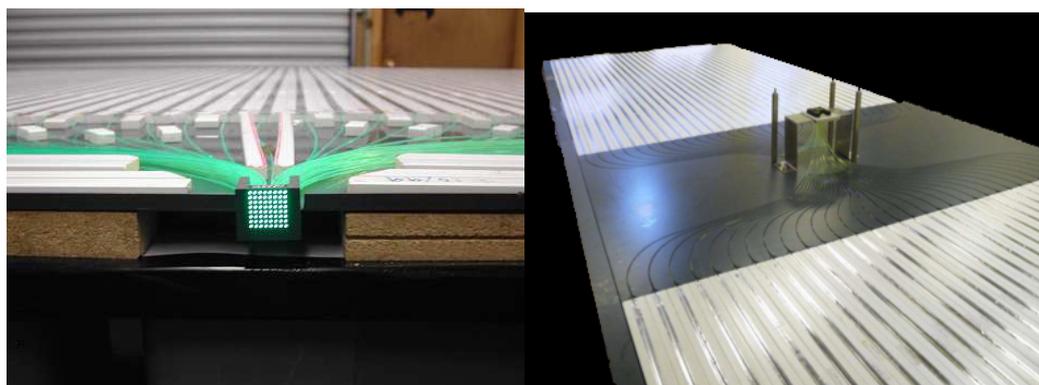


**Figura 1.5:** Mapa de ubicación del “Infill” de AMIGA. Los cuadrados azules representan los 1666 detectores de superficie del arreglo principal separados a 1500 metros entre sí. Los triángulos verdes representan los 61 detectores de superficie del “Infill” separados a 750 metros entre sí. Los círculos naranjas representan los 24 detectores de superficie del “Infill” separados a 433 metros entre sí. Las líneas de puntos azules representan el ángulo de apertura del telescopio de fluorescencia, ubicado en el cerro Coihueco (flecha azul) y las líneas rojas representan el ángulo de apertura del telescopio de fluorescencia de HEAT.

**Fuente:** arXiv:0710.1646v1 (30th International Cosmic Ray Conference)

Cada par de detectores del Infill está compuesto por un detector de superficie basado en efecto de radiación Cherenkov en agua (al igual que Pierre Auger) y un contador de muones, el cual está enterrado aproximadamente 2.5 metros bajo tierra, profundidad tal que no llega la componente electromagnética (electrones y gamas).

Cada contador de muones tiene una superficie de 30 metros cuadrados y está constituido por 64 varillas centelladoras, cada una con una fibra óptica adosada. Estas varillas centelladoras detectan partículas cargadas (mayormente muones ya que son las únicas partículas que pueden penetrar la tierra hasta los 2,5 metros de profundidad) y producen luz al ser excitados. Dicha luz es recogida por fibras ópticas WLS (Wavelength Shifter) y convertida en pulsos eléctricos mediante un tubo fotomultiplicador o PMT (Photomultiplier tube) Hamamatsu H8804-200MOD de 64 píxeles [Figura 1.6].



*Figura 1.6: Módulo centellador de 64 canales con el conector óptico para el PMT.*

*Fuente: ITeDA-CNEA (Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas)*

### ***Requerimientos de AMIGA para el sistema de telecomunicaciones***

Se precisa de un sistema de telecomunicaciones que provea conectividad TCP/IP entre cada uno de los 85 pares de detectores de Amiga (cada uno conformado por un detector de superficie y un contador de muones) con un sistema central de

procesamiento de datos en el campus Auger de Malargüe denominado CDAS (Central Data Acquisition System).

Este sistema de telecomunicaciones debe ser inalámbrico y por lo tanto debe consistir en un radio enlace punto multipunto que conecte cada uno de los pares de detectores (denominados suscriptores) con 1 o más equipos coordinadores en el edificio Coihueco, donde se ubica uno de los de detectores ópticos de fluorescencia.

El observatorio Pierre Auger puede ser visto como un gran detector de coincidencias compuesto por más de 1600 detectores de superficie capaces de determinar el momento cuando una partícula pasa a través de ellos. Actualmente ya existe un sistema de telecomunicaciones que interconecta los detectores de superficie con el CDAS, que es donde se produce la detección de coincidencias.

AMIGA, al ser una ampliación del Observatorio Pierre Auger, requiere un nuevo sistema de telecomunicaciones para evitar sobrecargar al sistema original de Auger.

En el infill de AMIGA, cada detector de superficie está conectado y sincronizado con un contador de muones enterrado.

Cuando un detector de superficie detecta partículas bajo ciertos parámetros físicos se produce lo que se denomina un evento de trigger T2 [Ref.10]. Las condiciones para que se produzca este T2 son cualquiera de las siguientes:

- Umbral: una señal por encima de los 3 VEM (Vertical Equivalent Muon) in 3 fotomultiplicadores del detector de superficie con una tasa de  $\sim 100\text{hz}$
- Tiempo por encima del umbral: una señal de 0.2 VEM durante 12/120 bins con una tasa de  $\sim 0.2\text{ Hz}$

En la electrónica de cada detector, durante cada trigger T2 se forma un T2 time stamp que consiste en un numero de 20 bits que representa el microsegundo dentro del segundo actual determinado por el sistema GPS, más 4 bits de datos adicionales que indican el tipo de trigger, o sea 24 bits en total.

El sistema de telecomunicaciones de AMIGA debe poder transportar la lista de todos estos T2 time stamps desde cada detector hasta el CDAS en el campus central de Malargüe, a nivel de aplicación a una frecuencia de 1hz.

Este tráfico actualmente es manejado por el sistema de telecomunicaciones actual de Auger. La idea es que en el futuro el nuevo sistema de telecomunicaciones de AMIGA también maneje el tráfico de los T2 únicamente en los detectores pertenecientes al infill.

### ***Cálculo del throughput del tráfico de T2***

$$\frac{[20 \text{ bits} (\text{time stamp}) + 4 \text{ bits} (\text{tipo de trigger})] \times 100 \text{ Hz}}{8 \text{ bits/bytes}} = 300 \text{ bytes/seg}$$

Como se mencionó anteriormente AMIGA está diseñado para tener 85 suscriptores, a los que se le suman 5 suscriptores extra con propósitos de calibración.

Por lo tanto el throughput total de AMIGA para los T2s es:

$$300 \text{ bytes/seg} \times 90 = 27 \text{ Kbytes/seg}$$

En el CDAS se están continuamente analizando la llegada de los T2, por lo que cuando se detecta que hay coincidencia de T2 time stamps de GPS provenientes de 3 o más detectores adyacentes entre sí, se produce lo que se denomina un evento de trigger T3.

Estadísticamente, en promedio el CDAS detecta un T3 cada 15 minutos, y en ese momento envía un requerimiento a todos los detectores de superficies involucrados en este T3 para que envíen los resultados de la conversión analógica digital de las mediciones de los tubos fotomultiplicadores que conforman cada detector.

Adicionalmente a esta información de los tubos fotomultiplicadores, el CDAS también solicita los datos del contador de muones enterrado por cada requerimiento T3, los cuales tienen un tamaño de aproximadamente 64 Kbits para los 4 módulos centelladores que compone cada contador de muones. Hay que tener en cuenta que estos datos se envían con un factor de compresión de  $\frac{1}{4}$  sin pérdida de información (en realidad el factor de compresión usualmente es mayor pero para tener un margen de seguridad en los cálculos se utilizó el valor de  $\frac{1}{4}$ ).

Desde el momento que el CDAS recibe todos los T2, los analiza, determina la ocurrencia de un evento T3 y envía el requerimiento de información a todos los

detectores pueden pasar hasta 20 segundos. Durante este tiempo, los datos requeridos se deben guardar en la electrónica de cada detector.

### ***Cálculo del throughput del tráfico de T3***

$$\frac{64 \text{ Kbit}(\text{datos}) \times 2(\text{factor de seguridad})}{4(\text{factor de compresión}) \times 8 \text{ bits/byte} \times 20 \text{ seg}} = 200 \text{ bytes/seg}$$

En 90 suscriptores:

$$200 \text{ bytes/seg} \times 90 = 18 \text{ Kbytes/seg}$$

### ***Cálculo del throughput total de AMIGA***

En conclusión, el throughput total de AMIGA será la suma de los throughput de T2 y T3, o sea:

Por suscriptor:

$$300 \text{ bytes/seg}(T2s) + 200 \text{ bytes/seg}(T3s) = 500 \text{ bytes/seg}$$

Total del sistema:

$$27 \text{ KBytes/seg}(T2s) + 18 \text{ Kbytes/seg}(T3s) = 45 \text{ Kbytes/seg}$$

### ***Máxima tasa de error tolerada***

En base a cálculos y en mediciones previas del tráfico en el observatorio Auger, se determina que para un correcto funcionamiento a nivel de aplicación, se puede tolerar como máximo una tasa de pérdida de datos de 0,01% para los T2, lo cual implica que prácticamente no se pierda ningún evento T3.

### ***Presupuesto energético***

En lo que respecta al hardware, el equipamiento de telecomunicaciones debe poder funcionar con un presupuesto energético máximo de 5 watts debido a que la energía proviene de baterías cargadas por paneles solares.

Por otro lado, las interconexiones entre los módulos centelladores de los contadores de muones deben ser hechas utilizando redes ethernet de área local (LAN).

Por último, es importante destacar que el sistema de telecomunicaciones diseñado para AMIGA debe funcionar en paralelo al sistema de telecomunicaciones actual de Auger, durante la fase de pruebas hasta que se demuestre que lo puede reemplazar totalmente, al menos para los detectores dentro del infill.

## ***Objetivos de trabajo***

Los objetivos del presente trabajo de tesis son:

- Incorporación al equipo de trabajo de AMIGA del Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas (CNEA - CONICET – UNSAM)
- Determinación de si el sistema de telecomunicaciones propuesto originalmente (con anterioridad a mi incorporación al equipo de trabajo) satisface o no los requisitos de AMIGA
- En caso de no satisfacer las necesidades de AMIGA colaborar en el diseño de un sistema de telecomunicaciones alternativo
- Realizar los cálculos teóricos de dicho sistema de telecomunicaciones alternativo
- Llevar a cabo las pruebas de campo correspondientes en el observatorio Pierre Auger en Malargüe
- Documentar las mediciones realizadas
- Obtener las conclusiones correspondientes
- Colaborar en la elaboración del paper “AMIGA at the Auger observatory: the telecommunications system” publicado en la revista científica “Journal of Instrumentation” [APÉNDICE A]

## ***CAPITULO 2: Análisis del sistema propuesto***

### ***Sistema de telecomunicaciones propuesto originalmente***

Como se describió anteriormente el sistema debe garantizar un throughput mínimo de 500 bytes/seg por cada suscriptor y cada suscriptor debe ser capaz de contactarse con el coordinador (CDAS) al menos 1 vez por segundo para poder enviar la lista de T2 que tiene contiene el time stamp de dicho segundo sincronizado por el GPS.

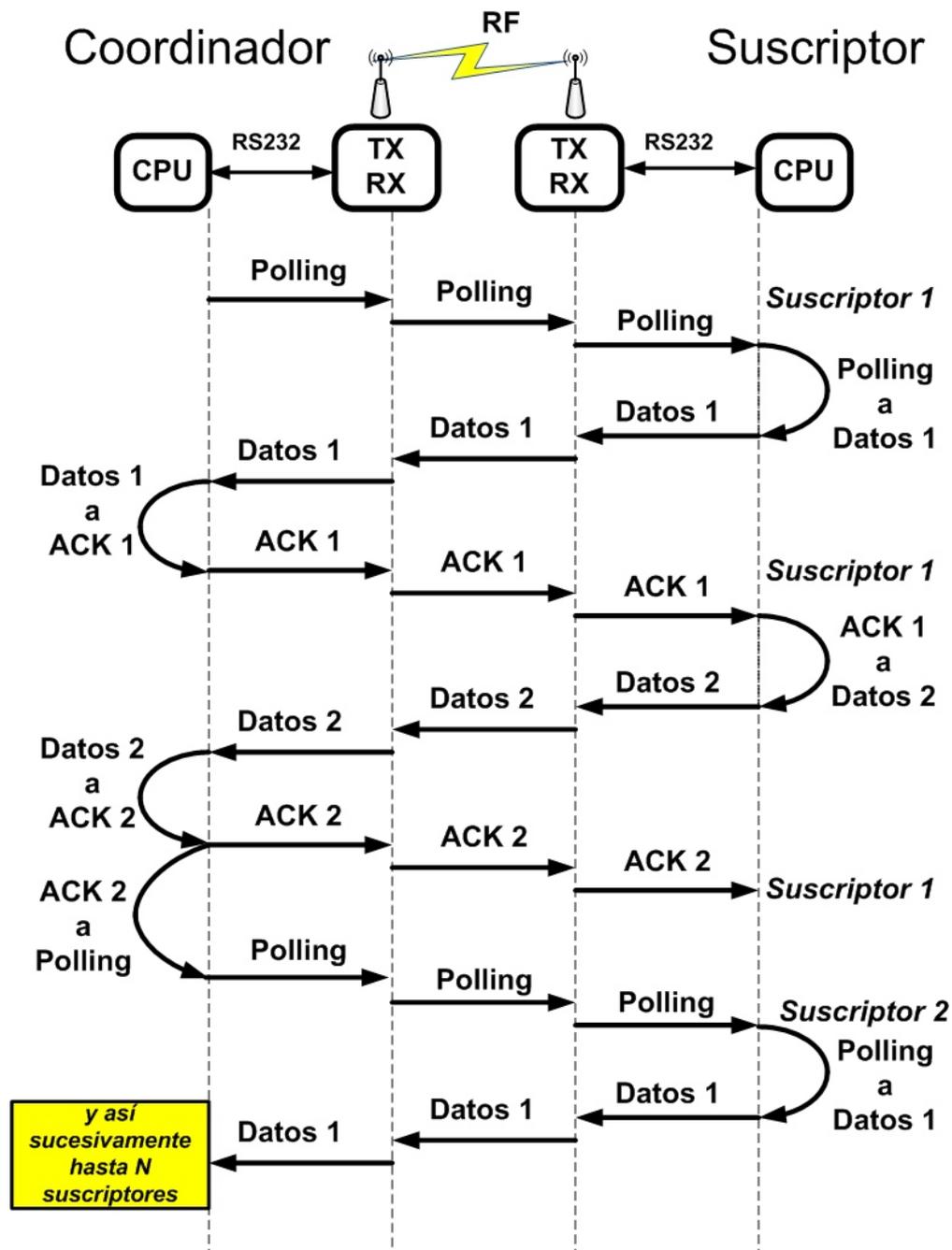
Dados estos requisitos descriptos de Auger y AMIGA, la topología más adecuada era tener enlaces punto multipunto en donde cada detector de superficie (suscriptor) se conecta con un hub central (coordinador) en el cerro Coihueco.

La aplicación fue diseñada con una una modalidad multiplexación por división de tiempo (TDMA), de manera tal que la comunicación se realice por un sistema de polling (o poleo) en donde uno o más coordinadores contacta a cada suscriptor (de a uno a la vez) y le solicita datos. Luego de que el suscriptor transmite los datos requeridos, el coordinador pasa a contactar al siguiente suscriptor. Recién luego de haber contactado a todos los suscriptores, el proceso se repite.

Originalmente con el surgimiento del proyecto AMIGA, para su sistema de telecomunicaciones inalámbrico se propuso utilizar equipos de radio de grado industrial marca Xbee, los cuales están basados en el estándar IEEE 802.15.4 [Ref.06]. Estos equipos tienen interfaces RS232 y principalmente se caracterizan por un muy bajo consumo de energía. Cabe aclarar que esto último es un requisito básico de AMIGA, ya que localmente cada detector debe auto-abastecerse por medio de paneles solares fotovoltaicos que almacenan la energía en baterías proveyendo un total de 20 watts, de los cuales se definió un máximo de 5 watts para poder ser utilizados en el hardware de telecomunicaciones.

Para el proyecto de AMIGA, el observatorio Pierre Auger asignó 3 canales del estándar IEEE 802.15.4 en la banda de 2.4 Ghz, cada uno con un ancho de banda de 250 Kbps. Por lo tanto es posible utilizar hasta 3 equipos coordinadores, cada uno con su propio canal.

El siguiente esquema [Figura 2.1] corresponde a las telecomunicaciones de la aplicación diseñada, utilizando una topología de un sólo coordinador, el cual realiza el polling a todos los suscriptores, recibiendo a su vez 2 paquetes de datos de cada uno por cada polling.



*Figura 2.1: esquema de comunicación entre un coordinador y un suscriptor considerando el envío de 2 paquetes de datos por cada polling*

*Fuente: autoría propia*

## ***Determinación de si el modelo propuesto satisface o no las necesidades del sistema de comunicaciones requerido por AMIGA***

Con el objetivo de determinar si el modelo propuesto originalmente podía cumplir con las necesidades de AMIGA se procedió a realizar cálculos a nivel de detalle de todo el proceso completo de telecomunicaciones.

Por otro lado la aplicación diseñada también introduce paquetes de control tales como solicitud de datos (polling) y confirmación de recepción de datos (ACK).

Para poder calcular la tasa efectiva de transmisión de datos útiles es necesario realizar un análisis completo de todo el proceso de la comunicación.

Los parámetros variables disponibles para experimentar eran los siguientes:

- ***Cantidad de coordinadores:*** Dado que se fueron asignados 3 canales del estándar IEEE 802.15.4, se podían utilizar entre 1 y 3 equipos coordinadores como máximo (1 canal para cada coordinador)
- ***Cantidad de paquetes (frames) por polling:*** Si bien el tamaño máximo del paquete que permite el estándar IEEE 802.15.4 es de 127 bytes, el máximo payload es 102 bytes. En cada polling la aplicación puede solicitar uno o más paquetes de datos a cada suscriptor. Cuantos más paquetes de datos se transfieran por cada polling, mejor será la tasa de transferencia efectiva ya que serán necesarios menor cantidad de pollings para llegar a la tasa de transferencia necesaria, y por lo tanto evitando múltiples headers de aplicación que agrega cada polling y que a su vez forman parte del payload del frame. Pero por otro lado, cuantos más paquetes de datos se transfieran por cada polling, más tiempo pasará en que un suscriptor vuelva a recibir su turno para enviar datos. La idea es experimentar con la cantidad de paquetes por polling, siempre verificando que se cumpla con los requisitos del sistema que es de tener una tasa mínima de transferencia de 500 bytes/seg por cada suscriptor y

de que a su vez cada suscriptor pueda comunicarse con un coordinador mínimamente 1 vez por segundo para poder enviar la lista de T2s.

### ***Análisis de los tiempos involucrados en una comunicación completa***

Básicamente el análisis se dividió en 3 etapas:

- A) Tiempos de procesamiento de CPU
- B) Tiempos de puertos serie RS232
- C) Tiempos de RF IEEE 802.15.4

### ***Medición de los tiempos de procesamiento de CPU***

Los tiempos de procesamiento fueron medidos directamente con un osciloscopio, conectando un coordinador directamente a un suscriptor, evitando la parte de la comunicación inalámbrica.

Osciloscopio conectado en la etapa de recepción (RX) y transmisión (TX) del suscriptor:



Figura 2.2: osciloscopio en RX y TX del suscriptor

Fuente: autoría propia

En la imagen del telescopio [Figura 2.2] se observa que desde la finalización de la recepción del paquete de solicitud de datos (polling) en color amarillo hasta el comienzo del envío del paquete de datos en color violeta, el tiempo transcurrido es de 4,48 ms.

Por otro lado, también se observa que desde la finalización de la recepción de un paquete de ACK en color amarillo hasta el comienzo de la transmisión de un nuevo paquete de datos en color violeta, el tiempo transcurrido es de 3,76 ms.

Osciloscopio conectado en la etapa de recepción (RX) y transmisión (TX) del coordinador:

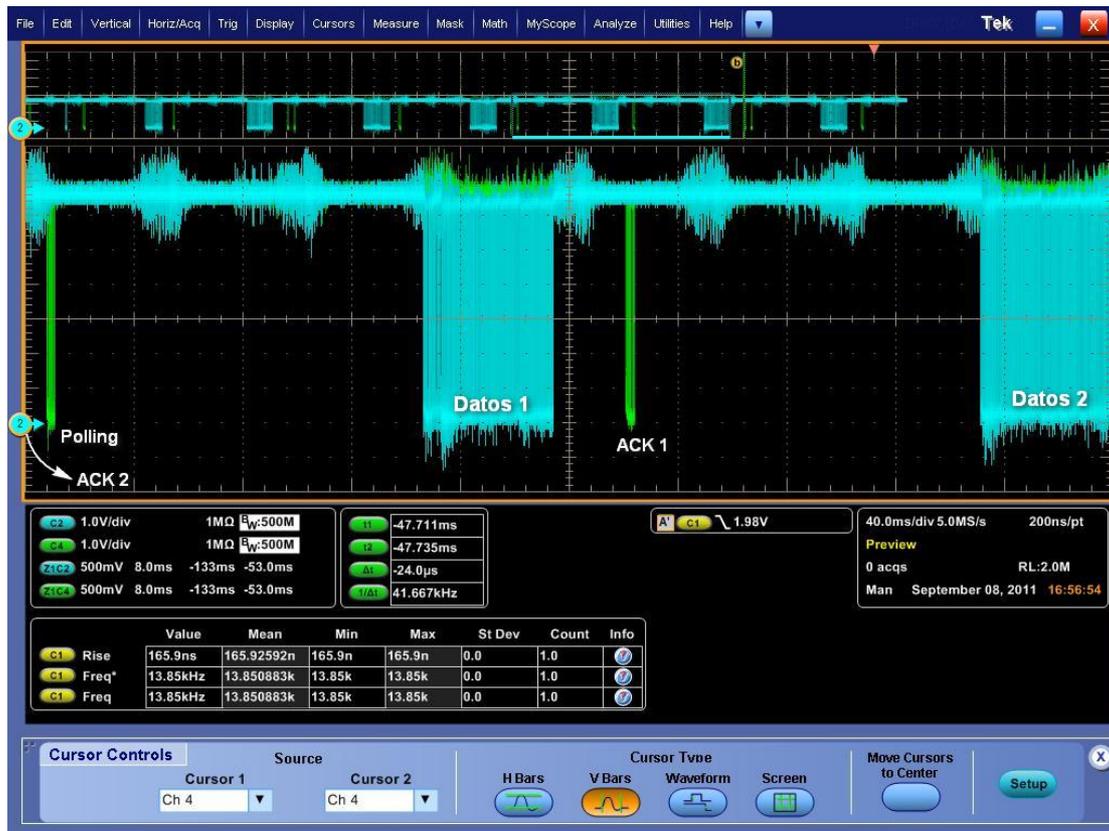


Figura 2.3: osciloscopio en RX y TX del coordinador

Fuente: autoría propia

En la imagen del telescopio [Figura 2.3] se observa que desde la finalización de la recepción del paquete de datos en color celeste hasta el comienzo del envío del paquete de ACK en color verde, el tiempo transcurrido es de 5,28 ms.

Por otro lado, también se observa que desde la finalización de la recepción de un paquete de ACK en color verde (en este caso está fuera del rango ampliado de la pantalla pero se puede observar en menor tamaño en la parte superior) hasta el comienzo de la transmisión de un nuevo paquete de solicitud de datos (polling) en color verde, el tiempo transcurrido es de 1,8 ms.

Osciloscopio conectado tanto en la etapa de recepción (RX) y transmisión (TX) del coordinador como del suscriptor:



Figura 2.4: osciloscopio en RX y TX del coordinador y suscriptor

Fuente: autoría propia

En resumen, con el osciloscopio hemos medido [Figura 2.4] los siguientes tiempos de procesamiento de CPU:

- A) de polling a datos = 4,48 ms
- B) de datos a ACK = 5,28 ms
- C) de ACK a datos = 3,76 ms
- D) de ACK a polling = 1,8 ms

Como se ve en la **[Figura 2.1]**, en una comunicación entre un coordinador y un suscriptor, considerando “n” paquetes de datos por polling, tenemos que considerar los siguientes tiempos:

de polling a datos1 -> (Tiempo A)

de datos(1) a ACK(1) -> (Tiempo B)

de ACK(1) a datos(2) -> (Tiempo C)

de datos(2) a ACK(2) -> (Tiempo B)

de ACK(2) a datos(3) -> (Tiempo C)

de datos(3) a ACK(3) -> (Tiempo B)

...

...

...

de ACK(n-1) a datos(n) -> (Tiempo C)

de datos(n) a ACK(n) -> (Tiempo B)

de ACK(n) a polling -> (Tiempo D)

Sumando todos los tiempos tenemos:

$$Tiempo\ total\ CPU = Tiempo\ A + n \times Tiempo\ B + (n - 1) \times Tiempo\ C + Tiempo\ D$$

Tomando como ejemplo n=2, el tiempo total de procesamiento de CPU será de:

$$4,48\ ms + 2 \times 5,28\ ms + (2 - 1) \times 3,76\ ms + 1,8\ ms = 20,6\ ms$$

### ***Cálculo de los tiempos por los circuitos serie (RS232)***

De acuerdo al tipo de codificación diseñado por la aplicación de comunicaciones, cada paquete de polling y cada paquete de acknowledge (ACK) precisan de 7 caracteres o bytes.

Los paquetes de datos se preparan con un máximo de 102 bytes, la cual es el tamaño máximo de carga que soportan los paquetes del estándar IEEE 802.15.4 que se utiliza en el tramo de RF.

El hardware del puerto serie, tanto del coordinador como de los suscriptores, utilizan el estándar RS232 asincrónico, con caracteres de 7 bits, 1 bit de inicio, 1 bit de paridad y 1 bit de parada. Por lo tanto por cada carácter o byte a transmitirse se utilizan 10 bits.

La velocidad del puerto serie del hardware es de 115200 bps.

Por lo tanto, el tiempo necesario para transmitir por el puerto un paquete de polling o un paquete de ACK será de:

$$\frac{7 \text{ bytes} \times 10 \text{ bits/byte}}{115200 \text{ bits/seg}} = 0,608 \text{ ms}$$

Por otro lado, el tiempo necesario para transmitir por el puerto un paquete de datos será de:

$$\frac{102 \text{ bytes} \times 10 \text{ bits/byte}}{115200 \text{ bits/seg}} = 8,854 \text{ ms}$$

En resumen, hemos calculado los siguientes tiempos de transferencia por serie RS232:

- A) paquete de polling = 0,608 ms
- B) paquete de datos = 8,854 ms
- C) paquete de ACK = 0,608 ms

Como se ve en la **[Figura 2.1]**, en una comunicación entre un coordinador y un suscriptor, considerando “n” paquetes de datos por polling, tenemos que considerar los siguientes tiempos:

polling -> (Tiempo A)

datos(1) -> (Tiempo B)

ACK(1) -> (Tiempo C)

datos(2) -> (Tiempo B)

ACK(2) -> (Tiempo C)

datos(3) -> (Tiempo B)

ACK(3) -> (Tiempo C)

...

...

...

datos(n) -> (Tiempo B)

ACK(n) -> (Tiempo C)

Sumando todos los tiempos tenemos:

$$\text{Tiempo total serie} = \text{Tiempo A} + n \times \text{Tiempo B} + n \times \text{Tiempo C}$$

como Tiempo A = Tiempo C, nos queda:

$$\text{Tiempo total serie RS 232} = (n+1) \times \text{Tiempo A} + n \times \text{Tiempo B}$$

Tomando como ejemplo  $n=2$ , el tiempo total por los circuitos serie RS232 será de:

$$\text{Tiempo total serie RS232} = (2+1) \times 0,608 \text{ ms} + 2 \times 8,854 \text{ ms} = 19,532 \text{ ms}$$

### ***Cálculo de los tiempos por radiofrecuencia (RF) basado en el estándar IEEE 802.15.4***

Para poder realizar los cálculos de la tasa efectiva de transferencia es necesario estudiar en detalle el funcionamiento del estándar IEEE 802.15.4, así como también la estructura del frame.

Si bien el estándar IEEE 802.15.4 soporta una tasa máxima de 250 Kbps, en la práctica la tasa efectiva es algo menor debido al protocolo embebido en la estructura del frame con sus overheads. Este protocolo introduce varios mecanismos para asegurar una transmisión de datos robusta, entre los cuales podemos mencionar:

- Algoritmo de acceso al canal: CSMA/CA
- Data verification
- Frame acknowledge (ACK)

### Tiempo de acceso al canal

En el modo “non-beacon enabled” el estándar IEEE 802.15.4 utiliza el mecanismo de acceso al canal CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), el cual permite que múltiples equipos utilicen el mismo medio de transmisión, evitando las colisiones.

Cada vez que un equipo necesite transmitir, espera un número al azar de unidades de períodos denominados de backoff. Este número al azar se encuentra en el siguiente rango:

$$[0, 2^{\text{BE}} - 1]$$

donde BE es el exponente de backoff y cuyo valor es un número entero entre 0 y 3 (su valor por defecto es 3)

Cada período de backoff se define como 20 períodos de símbolos y cada período de símbolo es igual a 16  $\mu\text{s}$ . Por lo tanto cada período de backoff es equivalente a 320  $\mu\text{s}$ .

Un vez que el equipo espera el tiempo determinado por  $[0, 2^{\text{BE}} - 1] \times 320 \mu\text{s}$ , evalúa si el canal se encuentra libre para transmitir mediante el proceso denominado CCA (Clear Channel Assessment). Si el canal se encuentra libre entonces el equipo transmite, de lo contrario espera nuevamente otro período al azar antes de intentar nuevamente acceder al canal.

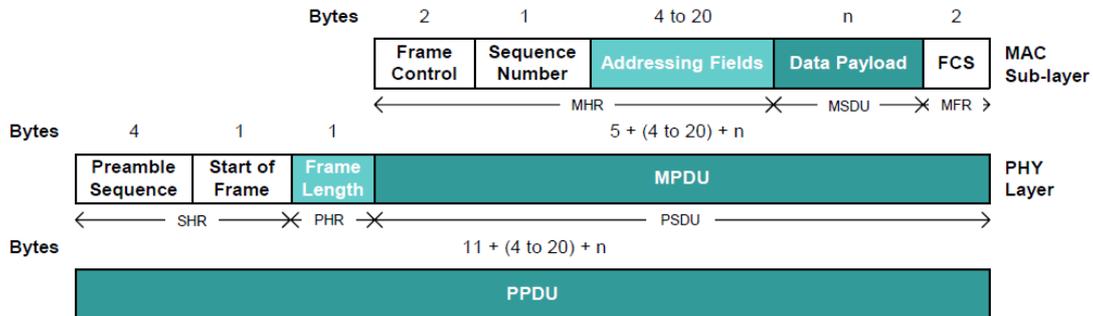
El tiempo requerido para el proceso de CCA se define como 8 períodos de símbolos, o sea  $8 \times 16 \mu\text{s} = 128 \mu\text{s}$ .

El peor caso del tiempo de acceso al canal se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{Período de backoff inicial} + \text{CCA} = \text{máximo}[0, 2^3 - 1] \times 320 \mu\text{s} + 128 \mu\text{s}$$

$$\text{Período de backoff inicial} + \text{CCA} = 7 \times 320 \mu\text{s} + 128 \mu\text{s} = 2,368 \text{ ms}$$

## Estructura del frame IEEE 802.15.4



**Figura 2.5:** vista esquemática de un frame IEEE 802.15.4

**Fuente:** IEEE 802.15™: WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS (PANs)

El tamaño máximo del MPDU (MAC Protocol Data Unit) que especifica el estándar IEEE 802.15.4 es de 127 bytes.

Por lo tanto y como se puede observar en la [Figura 2.5], la máxima carga útil de datos (data payload o MSDU), se puede calcular como:

Max Data Payload = Max MPDU – Overhead de la capa MAC (Media Access Control)

El overhead de la capa MAC está determinado por:

- Frame Control: 2 bytes
- Sequence Number: 1 byte
- Addressing fields: 10 bytes para dirección de origen + 10 bytes para dirección destino
- FCS (Frame Check Sequence): 2 bytes (sirven para el control de integridad)

En total el overhead de la capa MAC suma 25 bytes, por lo que el máximo payload es de:

$$127 \text{ bytes} - 25 \text{ bytes} = 102 \text{ bytes}$$

En la versión del estándar IEEE 802.15.4b, se permite utilizar un método de direccionamiento corto, con sólo 4 bytes (en lugar de 10 bytes) para las direcciones de origen y destino. Por lo tanto el máximo payload podría ser de 114 bytes.

En una topología del tipo estrella es posible sólo especificar la dirección origen en los equipos suscriptores obviando la dirección de destino que es siempre la misma (la del equipo coordinador en el centro de la topología estrella). En este caso el máximo payload podría ser de 118 bytes.

#### **Tiempo de transferencia de un paquete de datos IEEE 802.15.4**

Como se observa en la [Figura 2.5], en la capa física se agregan 6 bytes al MPDU correspondientes a los siguientes 3 símbolos:

- Preamble: preámbulo (4 bytes)
- Start of Frame Delimiter: delimitador que indica el comienzo del frame (1 byte)
- Frame Length: indica el largo del frame (1 byte)

Dado una velocidad de transferencia dada por el modem, tenemos que el tiempo de transferencia para un paquete de datos (con máximo payload) se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{(\text{tamaño máximo del MPDU} + \text{Preamble} + \text{Start of Frame} + \text{Frame Length}) \times 8}{\text{velocidad de transferencia del modem}}$$

para una velocidad de transferencia del modem de 250 Kbps, nos queda:

$$\frac{(127 + 4 + 1 + 1) \times 8}{250 \text{ Kbps}} = 4,256 \text{ ms (para un paquete de Datos)}$$

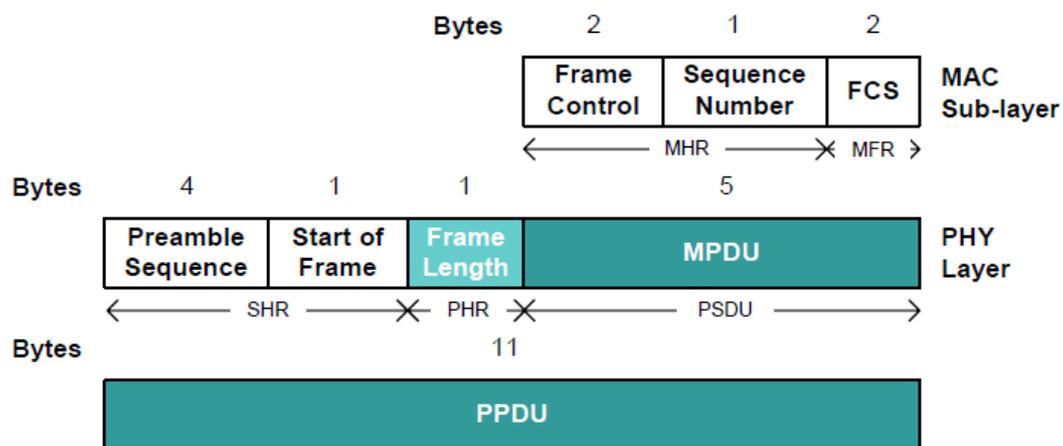
Para el caso de los paquetes de polling y ACK (a nivel de aplicación), en lugar de utilizar el máximo payload (102 bytes), se utiliza un payload de 7 bytes por lo que nos queda un tiempo de transferencia de:

$$\frac{(7+ 31) \times 8}{250 \text{ Kbps}} = 1,216 \text{ ms}$$

(tanto para un paquete de Polling como para un paquete de ACK de aplicación)

### Tiempo de transferencia de un paquete de acknowledge IEEE 802.15.4

Un paquete de acknowledge consiste de 11 bytes tal como muestra la siguiente [Figura 2.6]:



**Figura 2.6:** vista esquemática de un frame de acknowledge IEEE 802.15.4

**Fuente:** IEEE 802.15™: WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS (PANs)

Dado una velocidad de transferencia dada por el modem, tenemos que el tiempo de transferencia se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{(Frame\ Control + Sequence\ Number + FCS + Preamble + Start\ of\ Frame + Frame\ Length) \times 8}{velocidad\ de\ transferencia\ del\ modem}$$

para una velocidad de transferencia del modem de 250 Kbps, nos queda:

$$\frac{(2 + 1 + 2 + 4 + 1 + 1) \times 8}{250 \text{ Kbps}} = 0,352 \text{ ms}$$

La transmisión de un paquete de acknowledge comienza luego de un tiempo denominado “TurnaroundTime” que es el tiempo que le lleva al modem a intercambiar del modo de receptor al modo de transmisor o viceversa.

El tiempo TurnaroundTime es equivalente a 192  $\mu$ s

#### **Tiempo de retransmisión de un paquete IEEE 802.15.4**

En la práctica es improbable que la tasa de error en las transferencias de paquetes sea del 0%.

El macAckWaitDuration es el tiempo máximo que un transmisor debe esperar a recibir el paquete de acknowledge antes de intentar retransmitir un paquete.

En el estándar IEEE 802.15.4, el macAckWaitDuration se define como 54 períodos de símbolos.

$$\text{macAckWaitDuration} = 54 \times 16 \mu\text{s} = 0,864 \text{ ms}$$

#### **Tiempo de transferencia efectivo de un paquete IEEE 802.15.4**

De toda la información detallada arriba, podemos calcular el tiempo de transferencia efectivo teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- Configuración en modo “non-beacon enabled” (o sea usando CSMA/CA)
- El algoritmo CSMA/CA nunca encuentra el canal ocupado
- Se incluye un paquete de acknowledge subsecuente a cada paquete con datos
- No son necesarios reintentos de transmisión
- El payload máximo es de 102 bytes

El cálculo sería de esta manera:

$$\text{Periodo de backoff inicial} + \text{CCA} = 2,368 \text{ ms}$$

$$\text{Tiempo de transmisión de un paquete de datos con payload máximo} = 4,256 \text{ ms}$$

$$\text{Tiempo de Turnaround} = 0,192 \text{ ms}$$

*Tiempo de transmisión de un paquete de acknowledge = 0,352 ms*

*Tiempo de transferencia efectivo = 7,168 ms*

(para un paquete de Datos usando payload máximo)

Para el caso de los paquetes de polling y ACK (a nivel de aplicación), en lugar de utilizar el máximo payload (102 bytes), se utiliza un payload de 7 bytes por lo que nos queda un tiempo de transferencia efectivo de:

*Período de backoff inicial + CCA = 2,368 ms*

*Tiempo de transmisión de un paquete de datos con payload de 7 bytes = 1,216 ms*

*Tiempo de Turnaround = 0,192 ms*

*Tiempo de transmisión de un paquete de acknowledge = 0,352 ms*

*Tiempo de transferencia efectivo = 4,128 ms*

(tanto para un paquete de Polling como para un paquete de ACK de aplicación)

#### **Tiempo de transferencia real de un paquete IEEE 802.15.4**

El tiempo de transferencia real se puede calcular en un entorno no ideal en donde son necesarias retransmisiones debido a errores que se puedan producir en el medio o en el los equipos transmisores o receptores.

Asumiendo una tasa de error del 25% (por ejemplo) y que todos los paquetes que requieren retransmisión necesitan una única retransmisión, podemos calcular el tiempo de transmisión de un paquete de datos junto con su retransmisión como sigue:

*Período de backoff inicial + CCA = 2,368 ms*

*Tiempo de transmisión de un paquete de datos con payload máximo = 4,256 ms*

*macAckWaitDuration = 54 x 16  $\mu$ s = 0,864 ms (no recibe acknowledge)*

Retransmisión:

*Período de backoff inicial + CCA = 2,368 ms*

*Tiempo de transmisión de un paquete de datos con payload máximo = 4,256 ms*

*Tiempo de Turnaround = 0,192 ms*

*Tiempo de transmisión de un paquete de acknowledge = 0,352 ms*

*Tiempo total con retransmisión =  $2 \times 2,368 \text{ ms} + 2 \times 4,256 \text{ ms} + 0,864 \text{ ms} + 0,192 \text{ ms} + 0,352 \text{ ms}$*

*Tiempo total con retransmisión = 14,656 ms*

(para un paquete de Datos usando payload máximo)

Como se vio anteriormente, el tiempo de transmisión de un paquete de Datos usando payload máximo sin retransmisión es de 7,168 ms.

Por lo tanto con el 75% de paquetes tomando 7,168 ms y el 25% de paquetes tomando 14,656 ms, podemos calcular el tiempo promedio de transmisión de un paquete de datos como:

*Tiempo promedio de transmisión =  $7,168 \text{ ms} \times 0,75 + 14,656 \text{ ms} \times 0,25 = 9,04 \text{ ms}$*

En forma genérica, considerando una tasa de error “E” (con valores de “E” entre 0 y 1), podemos calcular el tiempo promedio de transmisión de un paquete de datos como:

$7,168 \text{ ms} \times (1 - E) + 14,656 \text{ ms} \times E = 7,168 \text{ ms} - 7,168 \text{ ms} \times E + 14,656 \text{ ms} \times E$

*Tiempo promedio de transmisión =  $7,488 \text{ ms} \times E + 7,168 \text{ ms}$*

Para el caso de los paquetes de polling y ACK (a nivel de aplicación), en lugar de utilizar el máximo payload (102 bytes), se utiliza un payload de 7 bytes por lo que nos queda un tiempo de transferencia real de:

*Período de backoff inicial + CCA = 2,368 ms*

*Tiempo de transmisión de un paquete de datos con payload de 7 bytes = 1,216 ms*

*macAckWaitDuration =  $54 \times 16 \mu\text{s} = 0,864 \text{ ms}$  (no recibe acknowledge)*

Retransmisión:

$$\text{Periodo de backoff inicial} + \text{CCA} = 2,368 \text{ ms}$$

$$\text{Tiempo de transmisión de un paquete de datos con payload de 7 bytes} = 1,216 \text{ ms}$$

$$\text{Tiempo de Turnaround} = 0,192 \text{ ms}$$

$$\text{Tiempo de transmisión de un paquete de acknowledge} = 0,352 \text{ ms}$$

$$\text{Tiempo total con retransmisión} = 2 \times 2,368 \text{ ms} + 2 \times 1,216 \text{ ms} + 0,864 \text{ ms} + 0,192 \text{ ms} + 0,352 \text{ ms}$$

$$\text{Tiempo total con retransmisión} = 8,576 \text{ ms}$$

(tanto para un paquete de Polling como para un paquete de ACK de aplicación)

Como se vio anteriormente, el tiempo de transmisión de un paquete de Polling o ACK sin retransmisión es de 4,128 ms.

Por lo tanto con el 75% de paquetes tomando 4,128 ms y el 25% de paquetes tomando 8,576 ms, podemos calcular el tiempo promedio de transmisión de un paquete de Polling o ACK como:

$$\text{Tiempo promedio de transmisión} = 4,128 \text{ ms} \times 0,75 + 8,576 \text{ ms} \times 0,25 = 5,24 \text{ ms}$$

En forma genérica, considerando una tasa de error "E" (con valores de "E" entre 0 y 1), podemos calcular el tiempo promedio de transmisión de un paquete de Polling o ACK como:

$$4,128 \text{ ms} \times (1 - E) + 8,576 \text{ ms} \times E = 4,128 \text{ ms} - 4,448 \text{ ms} \times E + 8,576 \text{ ms} \times E$$

$$\text{Tiempo promedio de transmisión} = 4,448 \text{ ms} \times E + 4,128 \text{ ms}$$

En resumen, hemos calculado los siguientes tiempos de transferencia promedio por RF:

$$\text{A) paquete de polling} = 4,448 \text{ ms} \times E + 4,128 \text{ ms}$$

$$\text{B) paquete de datos} = 7,488 \text{ ms} \times E + 7,168 \text{ ms}$$

$$\text{C) paquete de ACK} = 4,448 \text{ ms} \times E + 4,128 \text{ ms}$$

Como se ve en la [Figura 2.1], en una comunicación entre un coordinador y un suscriptor, considerando “n” paquetes de datos por polling, tenemos que considerar los siguientes tiempos:

polling -> (Tiempo A)

datos(1) -> (Tiempo B)

ACK(1) -> (Tiempo C)

datos(2) -> (Tiempo B)

ACK(2) -> (Tiempo C)

datos(3) -> (Tiempo B)

ACK(3) -> (Tiempo C)

...

...

...

datos(n) -> (Tiempo B)

ACK(n) -> (Tiempo C)

Sumando todos los tiempos tenemos:

$$Tiempo\ total\ por\ RF = Tiempo\ A + n \times Tiempo\ B + n \times Tiempo\ C$$

como Tiempo A = Tiempo C, nos queda:

$$Tiempo\ total\ RF = (n + 1) \times Tiempo\ A + n \times Tiempo\ B$$

$$Tiempo\ total\ RF = (n + 1) \times (4,448\ ms \times E + 4,128\ ms) + n \times (7,488\ ms \times E + 7,168\ ms)$$

Tomando como ejemplo n=2, y E= 0,1 (error del 10%)

$$Tiempo\ total\ RF = (2 + 1) \times (4,448\ ms \times 0,1 + 4,128\ ms) + 2 \times (7,488\ ms \times E + 7,168\ ms)$$

$$Tiempo\ total\ RF = 29,552\ ms$$

## ***Cálculo de los tiempos totales y tasa real de transferencia por suscriptor***

Para obtener el tiempo total de una comunicación, debemos sumar:

- A) Tiempo total de procesamiento de CPU
- B) Tiempo total de puertos serie RS232
- C) Tiempo total de RF IEEE 802.15.4

$$A = 4,48 \text{ ms} + n \times 5,28 \text{ ms} + (n - 1) \times 3,76 \text{ ms} + 1,8 \text{ ms}$$

$$B = (n + 1) \times 0,608 \text{ ms} + n \times 8,854 \text{ ms}$$

$$C = (n + 1) \times (4,448 \text{ ms} \times E + 4,128 \text{ ms}) + n \times (7,488 \text{ ms} \times E + 7,168 \text{ ms})$$

Esta suma corresponde al tiempo total de una comunicación entre un coordinador y un suscriptor, en donde se transfieren “n” paquetes de datos con una tasa de error “E”.

Luego, la cantidad máxima de bytes de payload transferida por comunicación está dada por “n” x 102 bytes (cantidad máxima de bytes en el payload de un paquete IEEE 802.15.4)

Finalmente tenemos que la cantidad de pollings por segundo por suscriptor está determinada por:

$$\frac{\text{cantidad de pollings}}{(\text{segundo} \times \text{suscriptor})} = \frac{\text{Cantidad de coordinadores}}{\frac{\text{cantidad de suscriptores}}{\text{coordinador}} \times \text{tiempo total de una comunicación}}$$

Como se mencionó anteriormente, es requisito de AMIGA que este valor sea superior a 1 (o sea que cada suscriptor pueda transmitir sus datos al menos 1 vez por segundo) y la cantidad máxima de bytes de payload transferida por segundo por cada suscriptor está dada por el producto entre la cantidad de pollings por segundo por suscriptor y la cantidad de bytes de payload máximo por polling por suscriptor.

$$\textit{Throughput por suscriptor} = \frac{\textit{cantidad de pollings}}{(\textit{segundo} \times \textit{suscriptor})} \times \frac{\textit{cantidad de bytes de payload max}}{\textit{polling} \times \textit{suscriptor}}$$

También como se mencionó anteriormente, es requisito de AMIGA que este valor sea superior a 500 bytes/segundo.

Se observa que la cantidad de paquetes que admita transmitir por cada polling de suscriptor va a impactar directamente en la cantidad de bytes transmitidos en cada comunicación entre suscriptor con su respectivo coordinador.

$$\frac{\textit{cantidad de bytes de payload max}}{\textit{polling} \times \textit{suscriptor}} = \textit{máx payload de } 802.15.4 \times \frac{\textit{paquetes}}{\textit{polling}}$$

## ***Resultados***

Se desarrolló una planilla de cálculo [Ref.15] en donde se transcribieron todos los cálculos de tiempos y todas las variables con el objetivo de determinar si el sistema propuesto podría satisfacer ambos requisitos de AMIGA para los 85 detectores (más 5 detectores adicionales con fines de calibración).

En principio se experimentó con los siguientes parámetros, que son los más favorables para intentar cumplir con los requisitos:

- Número de coordinadores: 3 (que es la máxima posible dados los 3 canales 802.15.4 disponibles)
- Tasa de transferencia de RF: 250Kbps (máxima posible)
- Tasa de error de RF: 0% (mínima posible)

A continuación se muestran los resultados de los cálculos con 90 suscriptores variando la la cantidad de paquetes de datos transmitidos por cada comunicación entre coordinador y suscriptor.

<p><b>Parámetros:</b></p> <p>N° coordinadores: <b>3</b></p> <p>N° suscriptores: <b>90</b></p> <p>Paquetes de datos por polling: <b>2</b></p>	<p><b>Cálculos intermedios:</b></p> <p>Tiempo total (ms) de una comunicación entera entre un coordinador y un suscriptor: <b>86,38</b></p> <p>Bytes de payload máximo por polling por suscriptor: <b>204</b></p>
<p><b>Requisito 1 de AMIGA</b> (debe ser mayor a 1)</p> <p>Cantidad de pollings por segundo por suscriptor: <b>0,39</b></p>	<p><b>Requisito 2 de AMIGA:</b> (debe ser mayor a 500)</p> <p>Bytes de payload máximo por segundo por suscriptor: <b>78,72</b></p>

*Tabla 2.1: 3 coordinadores, 90 suscriptores, 2 paquetes de datos por polling*

Se observa en la [Tabla 2.1] que la cantidad de pollings por segundo es bastante menor a 1 y que la cantidad de bytes de payload máximo por segundo por suscriptor es bastante menor a 500, por lo tanto con estos valores no es posible cumplir con los requisitos de AMIGA.

Se puede verificar a continuación en la [Tabla 2.2] que duplicando la cantidad de paquetes por polling (de 2 a 4), baja en forma proporcional (o sea casi a la mitad) la cantidad de pollings por segundo por suscriptor (de 0,39 a 0,20), pero sin embargo aumenta en forma muy paulatina (en un orden de sólo el 5%) la cantidad de bytes de payload máximo que cada suscriptor puede transmitir por cada comunicación con sus coordinador (de 78,72 a 82,47).

<b>Parámetros:</b>  N° coordinadores: <b>3</b>  N° suscriptores: <b>90</b> Paquetes de datos por polling: <b>4</b>	<b>Cálculos intermedios:</b> Tiempo total (ms) de una comunicación entera entre un coordinador y un suscriptor: <b>164,90</b> Bytes de payload máximo por polling por suscriptor: <b>408</b>
---	--

<b>Requisito 1 de AMIGA</b> (debe ser mayor a 1)  Cantidad de pollings por segundo por suscriptor: <b>0,20</b>	<b>Requisito 2 de AMIGA:</b> (debe ser mayor a 500)  Bytes de payload máximo por segundo por suscriptor: <b>82,47</b>
---	--

*Tabla 2.2: 3 coordinadores, 90 suscriptores, 4 paquetes de datos por polling*

De la misma manera, observamos en la [Tabla 2.3] que aumentando 10 veces la cantidad de paquetes por polling (de 2 a 20), baja en forma proporcional (o sea a la décima parte) la cantidad de pollings por segundo por suscriptor (de 0,39 a 0,04), pero sin embargo aumenta en forma muy paulatina (en un orden de sólo el 9%) la cantidad de bytes de payload máximo que cada suscriptor puede transmitir por cada comunicación con sus coordinador (de 78,72 a 85,74).

<b>Parámetros:</b>  N° coordinadores: <b>3</b>  N° suscriptores: <b>90</b> Paquetes de datos por polling: <b>20</b>	<b>Cálculos intermedios:</b> Tiempo total (ms) de una comunicación entera entre un coordinador y un suscriptor: <b>793,06</b> Bytes de payload máximo por polling por suscriptor: <b>2040</b>
--	---

<b>Requisito 1 de AMIGA</b> (debe ser mayor a 1)  Cantidad de pollings por segundo por suscriptor: <b>0,04</b>	<b>Requisito 2 de AMIGA:</b> (debe ser mayor a 500)  Bytes de payload máximo por segundo por suscriptor: <b>85,74</b>
---	--

*Tabla 2.3: 3 coordinadores, 90 suscriptores, 20 paquetes de datos por polling*

Finalmente se probaron distintos valores de los parámetros con el objetivo de determinar la cantidad máxima de suscriptores que el sistema puede soportar.

<p><b>Parámetros:</b></p> <p>N° coordinadores: <b>3</b></p> <p>N° suscriptores: <b>14</b></p> <p>Paquetes de datos por polling: <b>2</b></p>	<p><b>Cálculos intermedios:</b></p> <p>Tiempo total (ms) de una comunicación entera entre un coordinador y un suscriptor: <b>86,38</b></p> <p>Bytes de payload máximo por polling por suscriptor: <b>204</b></p>
<p><b>Requisito 1 de AMIGA</b> (debe ser mayor a 1)</p> <p>Cantidad de pollings por segundo por suscriptor: <b>2,48</b></p>	<p><b>Requisito 2 de AMIGA:</b> (debe ser mayor a 500)</p> <p>Bytes de payload máximo por segundo por suscriptor: <b>506,05</b></p>

*Tabla 2.4: 3 coordinadores, 14 suscriptores, 2 paquetes de datos por polling*

<p><b>Parámetros:</b></p> <p>N° coordinadores: <b>3</b></p> <p>N° suscriptores: <b>14</b></p> <p>Paquetes de datos por polling: <b>5</b></p>	<p><b>Cálculos intermedios:</b></p> <p>Tiempo total (ms) de una comunicación entera entre un coordinador y un suscriptor: <b>204,16</b></p> <p>Bytes de payload máximo por polling por suscriptor: <b>510</b></p>
<p><b>Requisito 1 de AMIGA</b> (debe ser mayor a 1)</p> <p>Cantidad de pollings por segundo por suscriptor: <b>1,05</b></p>	<p><b>Requisito 2 de AMIGA:</b> (debe ser mayor a 500)</p> <p>Bytes de payload máximo por segundo por suscriptor: <b>535,29</b></p>

*Tabla 2.5: 3 coordinadores, 14 suscriptores, 5 paquetes de datos por polling*

## ***Conclusión***

Se comprobó que el sistema con 3 coordinadores podría llegar a manejar una cantidad máxima de 14 suscriptores (número muy por debajo de 90), utilizando una cantidad de entre 2 y 5 paquetes de datos por polling [**Tabla 2.4**] y [**Tabla 2.5**]

Esto demuestra que el sistema de telecomunicaciones propuesto originalmente no es capaz de satisfacer los requisitos mínimos de AMIGA.

## ***CAPITULO 3: Sistema alternativo***

Con el fin satisfacer los requerimientos del sistema de telecomunicaciones del AMIGA, se propone utilizar una red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.11, principalmente porque permite una velocidad de transferencia de datos considerablemente superior al estándar IEEE 802.15.4, y por otro lado se trata de un estándar muy difundido a nivel comercial, por lo que es posible encontrar una gran variedad de equipos con costos muy económicos.

Para obtener un correcto funcionamiento de la red, se deben tener en cuenta varios factores para minimizar los tiempos de respuesta, aumentar las tasas de transferencia de datos, así como también asegurar la confiabilidad del sistema. Como consecuencia, se buscaron, analizaron y eligieron equipos de radio WiFi de bajo consumo y grado industrial, los cuales trabajan con TCP/IP bajo el estándar IEEE 802.11.

### ***Utilización del espectro de frecuencia***

El observatorio Pierre Auger había asignado originalmente 3 canales (15, 23 y 24) del estándar 802.15.4 para el proyecto AMIGA.

<b>Canal 802.15.4</b>	<b>frecuencia baja (Mhz)</b>	<b>frecuencia central (Mhz)</b>	<b>frecuencia alta (Mhz)</b>
<b>15</b>	2424	2425	2426
<b>23</b>	2464	2465	2466
<b>24</b>	2469	2470	2471
25	2474	2475	2476

***Tabla 3.1: Asignación del espectro de frecuencia por parte del observatorio Pierre Auger***

Como puede observarse en la [Tabla 3.1], entre los canales hay una separación de 3 Mhz. Como los 3 canales asignados no eran consecutivos, el máximo ancho de banda

disponible era desde la frecuencia baja del canal 23 (2464 Mhz) hasta la frecuencia alta del canal 24 (2471 Mhz), o sea de 7 Mhz. Con el objetivo de maximizar el ancho de banda disponible se solicitó al observatorio Pierre Auger el intercambio del canal 15 por el canal 25. De esta manera el máximo ancho de banda disponible quedó finalmente desde la frecuencia baja del canal 23 (2464 Mhz) hasta la frecuencia alta del canal 25 (2476 Mhz), o sea de 12 Mhz.

Como el ancho de banda de un canal de WiFi 802.11g es de 20 Mhz, y sólo se tiene disponible 12 Mhz (desde 2464 Mhz hasta 2476 Mhz), se tomó la decisión de configurar los equipos de radio para que utilicen un 50% del ancho de banda (o sea 10 Mhz) del canal asignado, el cuál se centró en la frecuencia de 2469 Mhz (con una frecuencia baja de 2464 Mhz y una frecuencia alta de 2474 Mhz).

### ***Equipos seleccionados***

El equipo coordinador, localizado en Coihueco, consiste en un equipo de radio de marca Ubiquiti, modelo Rocket M2 [APÉNDICE B].

Para poder determinar el valor de apertura mínimo de la antena para este equipo, se geolocalizaron con “Google Earth” los tanques detectores extremos del Infill de AMIGA y utilizando el software “Golden Ratio” se calculó el ángulo que forman trazando vectores desde sus posiciones geográficas hacia la posición de Coihueco. Dicho ángulo resultó ser de 60 grados [Figura 3.1], y por tal motivo se seleccionó una antena de 120° de apertura (teniendo un margen de seguridad de 30 grados para cada lado) que tiene una ganancia de 15 dBi, la cual está orientada de manera tal que es capaz de comunicarse con cualquier equipo suscriptor perteneciente al infill de AMIGA.

La idea en el futuro es agregar un segundo equipo de radio para ser utilizado como backup, así como también un tercer equipo cuya función será la de monitorear el espectro buscando alguna posible interferencia en el canal WiFi de AMIGA.

Por el lado de los suscriptores se seleccionaron equipos de radio de marca Ubiquiti, modelo AirGrid M2 [APÉNDICE C]. Dicho equipo tiene su correspondiente antena

omnidireccional de 20 dBi de ganancia, la cual está orientada de manera tal que es capaz de comunicarse con el equipo coordinador de AMIGA ubicado en Coihueco.



**Figura 3.1:** Cálculo del ángulo mínimo de apertura (60 grados) para la antena del equipo coordinador ubicado en Coihueco

**Fuente:** Google Earth + Golden Ratio

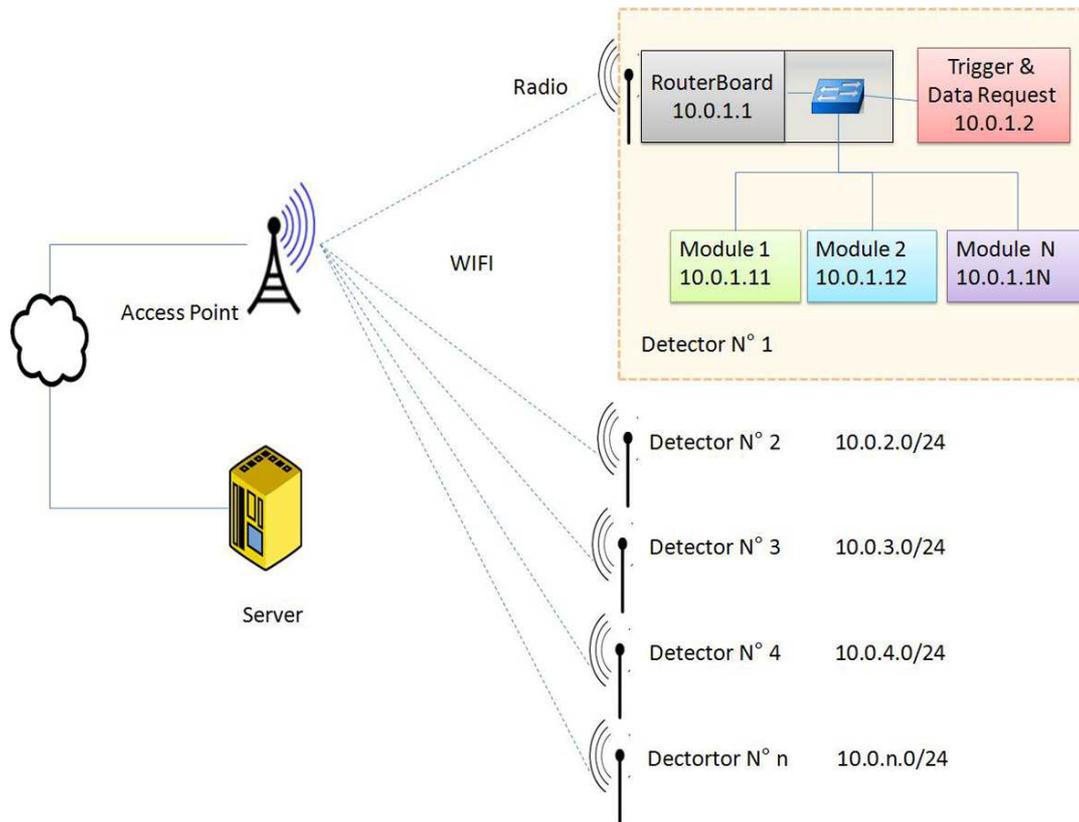
### ***Potencia conducida de cresta máxima del transmisor***

Para cumplir con la potencia máxima admisible detallada en la resolución 302/1998 de la Secretaría de Comunicaciones [APÉNDICE D], se limitó la potencia de salida del equipo coordinador a 26 dBm. En cambio, en los equipos suscriptores no fue necesario limitar la potencia de salida cuyo valor máximo es de 20 dBm

### ***Configuración de la red***

La configuración de la red [Figura 3.2] fue diagramado con un direccionamiento TCP/IP privado, tal que cada subred tenga un máximo de 254 direcciones IP disponibles (o sea se utilizó una máscara de red /24).

Para el coordinador de Coihueco se asignó la subred 10.0.0.0/24, mientras que para los suscriptores se asignaron las subredes 10.0.n.0/24, en donde n es el número de detector.



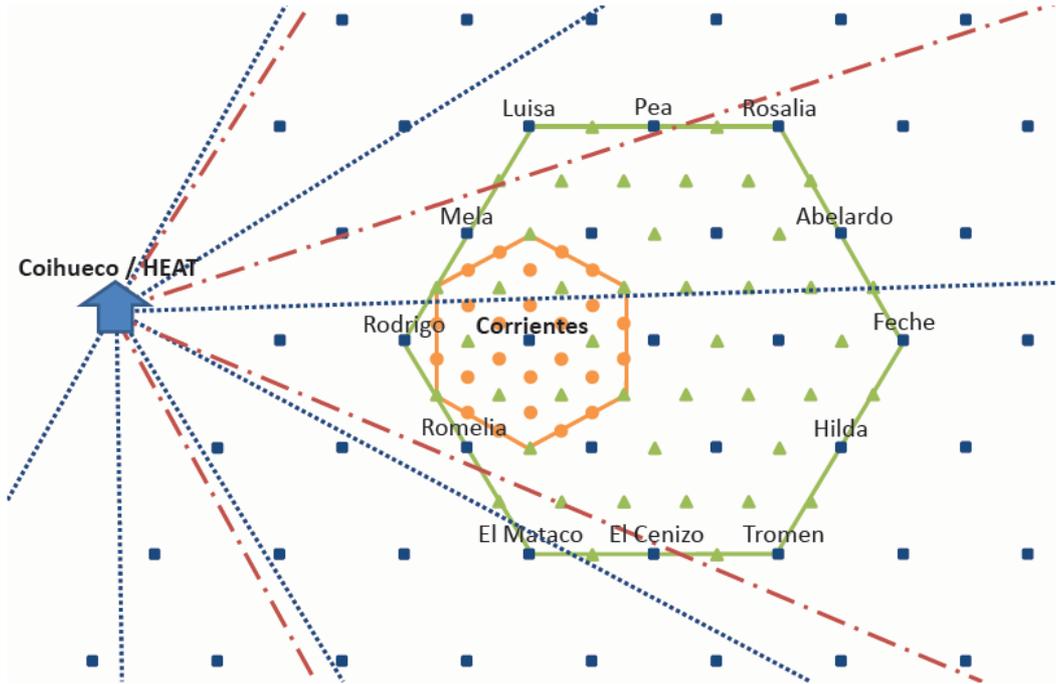
**Figura 3.2:** Esquema de direccionamiento IP utilizado para AMIGA

**Fuente:** “AMIGA at the Auger observatory: the telecommunications system” publicado en la revista científica “Journal of Instrumentation” [APÉNDICE A]

## *CAPITULO 4: Cálculo de los radioenlaces*

### *Esquema de conexión*

De los 85 detectores que conforman el infill de AMIGA [Figura 4.1] se decidió realizar pruebas de campo de telecomunicaciones entre 5 tanques detectores en donde se instalaron equipos Ubiquiti Airgrid M2 (suscriptores), y Coihueco en donde se colocó un equipo Ubiquiti Rocket M2 (coordinador). En la [Tabla 4.1] se detallan los nombres de dichos tanques detectores, sus coordenadas geográficas, así como también la distancia hacia Coihueco. En la [Figura 4.2] puede apreciarse que 3 de las 5 ubicaciones geográficas seleccionadas son las más alejadas de Coihueco, ya que en caso de ser exitosas las pruebas de telecomunicaciones en cuanto a intensidad de señal, luego podrá inferirse que no habrá inconvenientes en el resto de las ubicaciones que son mas cercanas. Por último en la [Figura 4.3] se puede apreciar una imagen satelital de las ubicaciones en donde se realizaron las pruebas.



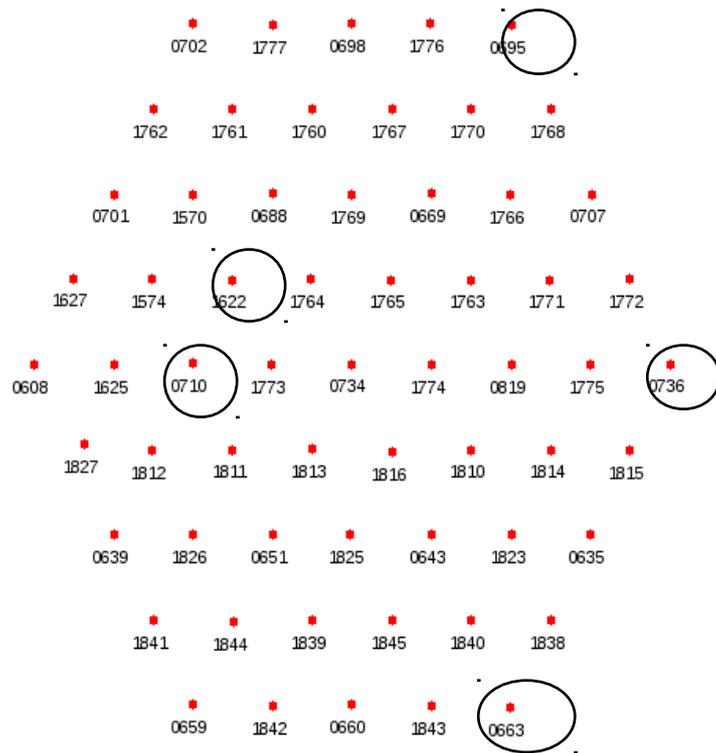
**Figura 4.1:** Mapa de ubicación del “Infill” de AMIGA, los puntos azules representan los Los cuadrados azules representan los 1666 detectores de superficie del arreglo principal separados a 1500 metros entre sí. Los triángulos verdes representan los 61 detectores de superficie del “Infill” separados a 750 metros entre sí. Los círculos naranjas representan los 24 detectores de superficie del “Infill” separados a 433 metros entre sí. Las líneas de puntos azules representan el ángulo de apertura del telescopio de fluorescencia, ubicado en el cerro Coihueco (flecha azul) y las líneas rojas representan el ángulo de apertura del telescopio de fluorescencia de HEAT.

**Fuente:** arXiv:0710.1646v1 (30th International Cosmic Ray Conference)

Ubicación	distancia		northing	easting	Latitud (grados)	Longitud (grados)
	N° tanque	a Coihueco (km)				
<b>Coihueco</b>		0	6114140	445343.8	-35.11409	-69.59979
<b>Corrientes Phil</b>	710	4.54	6113933.36	449884.73	35.116188	-69.54997
<b>Collins</b>	1622	4.92	6114571.74	450248.61	35.110455	-69.545944
<b>Feche</b>	736	9.03	6113929.59	454381.66	-35.11644	-69.500626
<b>Rosalía</b>	695	7.9	6116518.56	452877.97	35.093025	-69.516991
<b>Tromen</b>	663	8.04	6111305.83	452867.84	35.140026	-69.51739

*Tabla 4.1: Ubicaciones donde se instalaron equipos para realizar pruebas de telecomunicaciones*

XX  
COIHUECO



*Figura 4.2: esquema de ubicación de los detectores dentro del infill en donde se realizaron las pruebas de campo.*



**Figura 4.3:** imagen satelital de ubicación de los detectores dentro del infill en donde se realizaron las pruebas de campo.

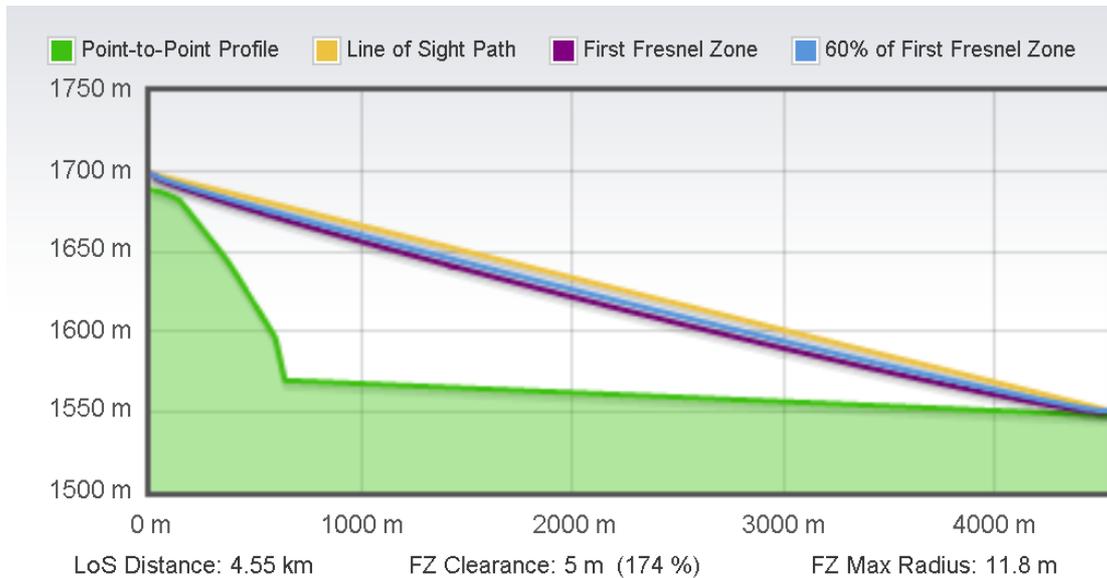
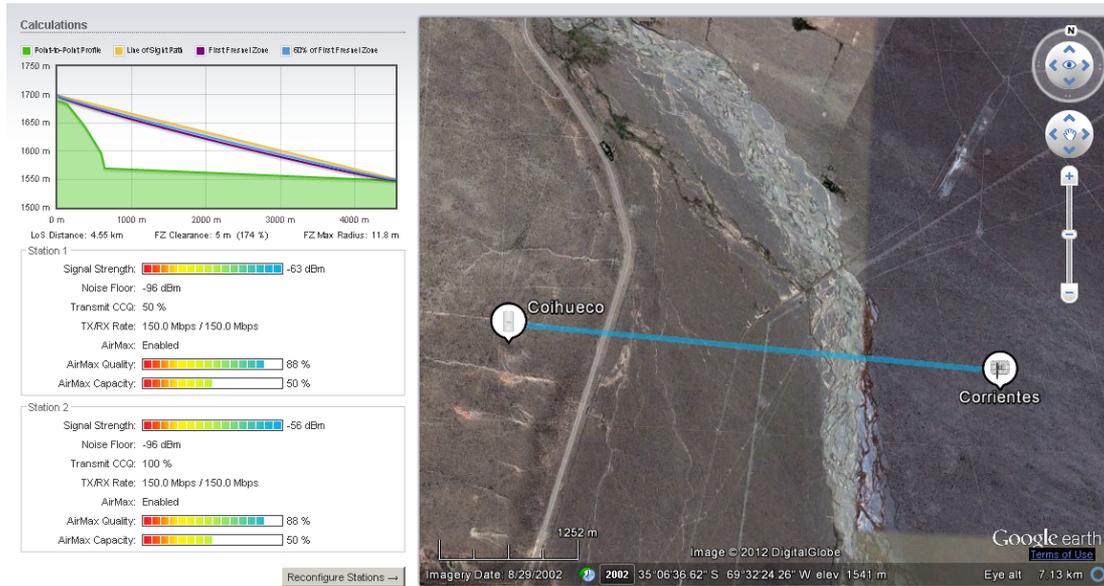
**Fuente:** imagen obtenida por Google Earth

### ***Cálculo de línea de vista y zona de Fresnel***

Para realizar la simulación y cálculo del enlace con cada uno de los tanques se utilizó la aplicación “AirLink outdoor wireless link calculator”, la cuál es propietaria de la empresa Ubiquiti Networks [Ref.11]. Para el extremo del coordinador en Coihueco se seleccionó la radio Ubiquiti Rocket M2 con un panel de 120° y 15 dBi, mientras que para los suscriptores se seleccionaron las radios Ubiquiti AirGrid M2 con antenas de 20 dBi omnidireccional. En la [Figura 4.4], [Figura 4.5], [Figura 4.6], [Figura 4.7] y [Figura 4.8] se encuentran los resultados de las simulaciones y cálculos, en cuyos gráficos se pueden observar los siguientes datos:

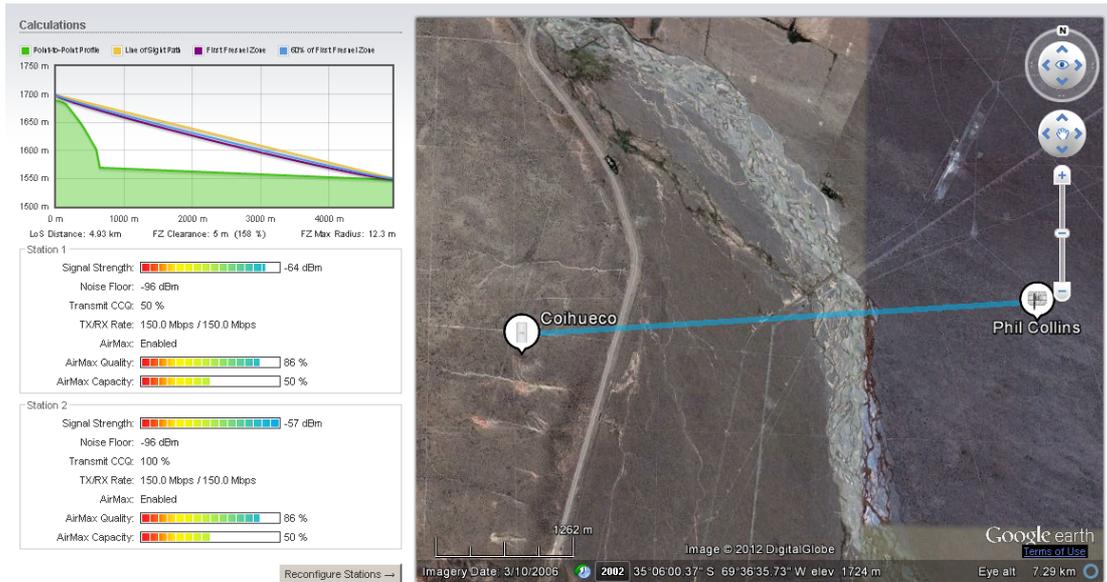
- En verde se grafica el perfil del suelo punto a punto.
- En amarillo se grafica la línea de vista.
- En violeta se grafica la primera zona de Fresnel

- En azul se grafica el 60% de la primera zona de Fresnel



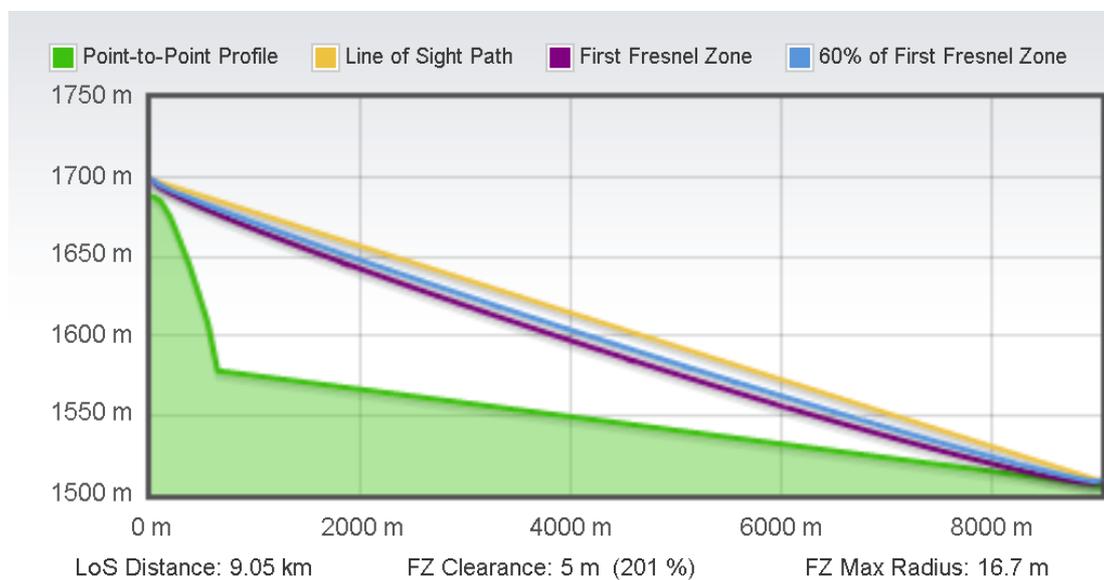
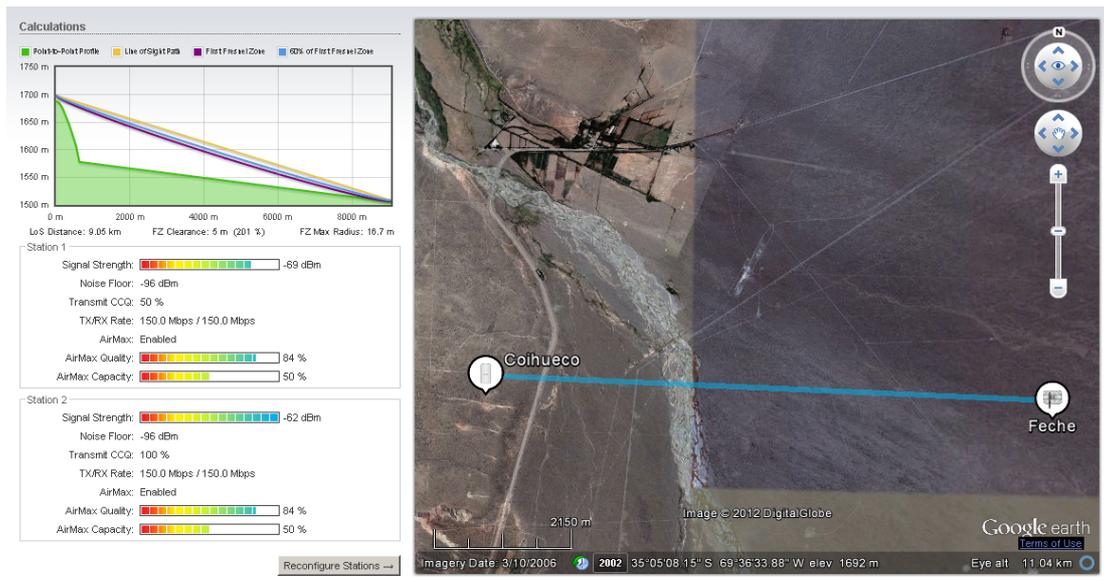
**Figura 4.4:** Enlace entre Coihueco y el tanque 0710 (Corrientes). Se observa la ubicación en mapa tanto del coordinador en Coihueco como del suscriptor, el perfil del terreno entre ambos, así como también las diferentes zonas de Fresnel del enlace en cuestión.

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación Airlink outdoor wireless link calculator, propietaria de Ubiquiti Networks



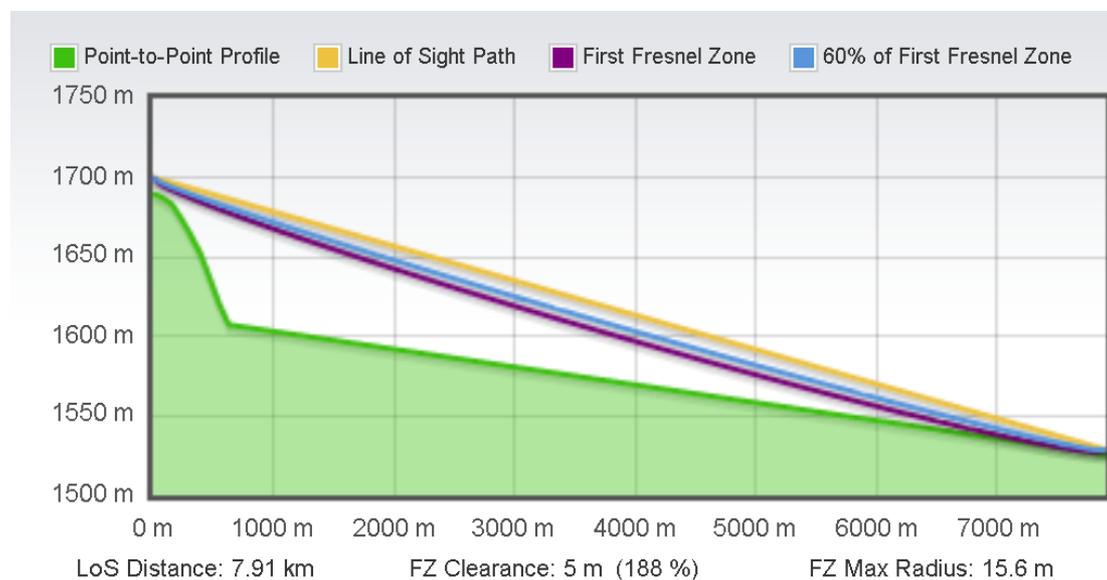
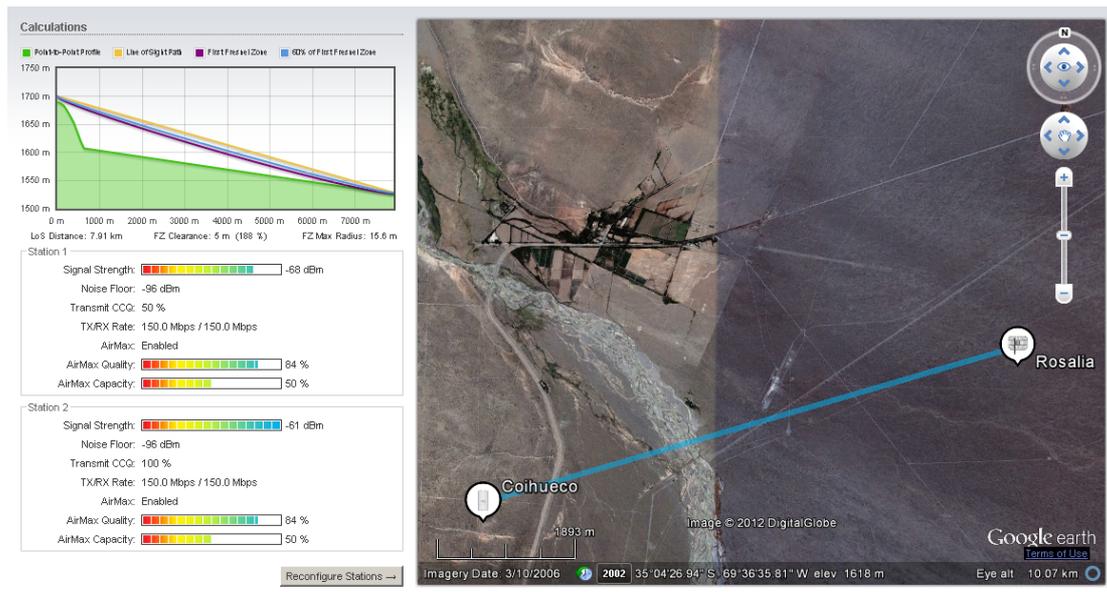
**Figura 4.5:** Enlace entre Coihueco y el tanque 1622 (Phil Collins). Se observa la ubicación en mapa tanto del coordinador en Coihueco como del suscriptor, el perfil del terreno entre ambos, así como también las diferentes zonas de Fresnel del enlace en cuestión.

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación Airlink outdoor wireless link calculator, propietaria de Ubiquiti Networks



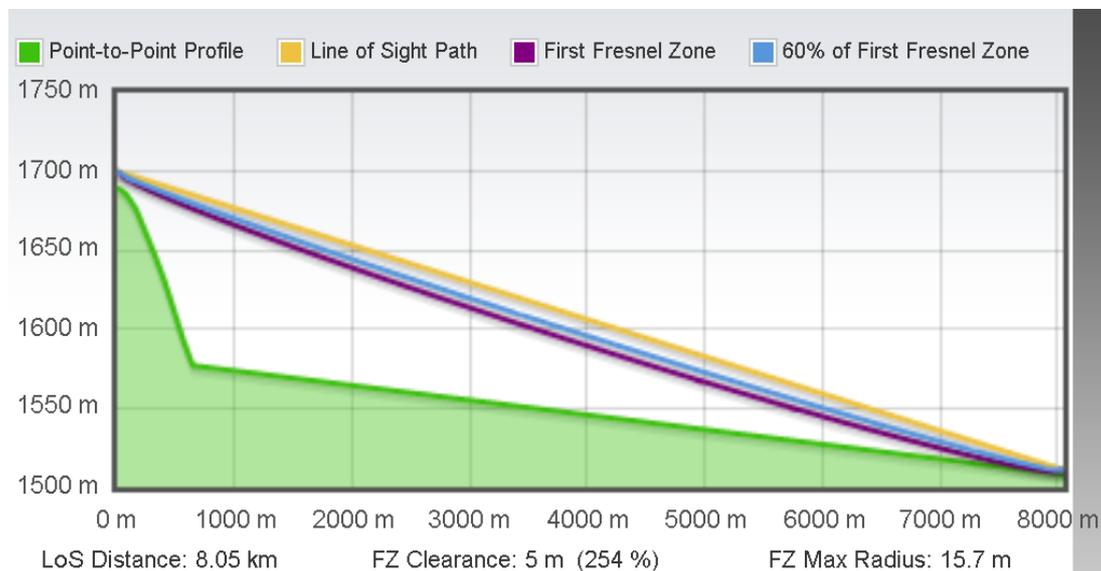
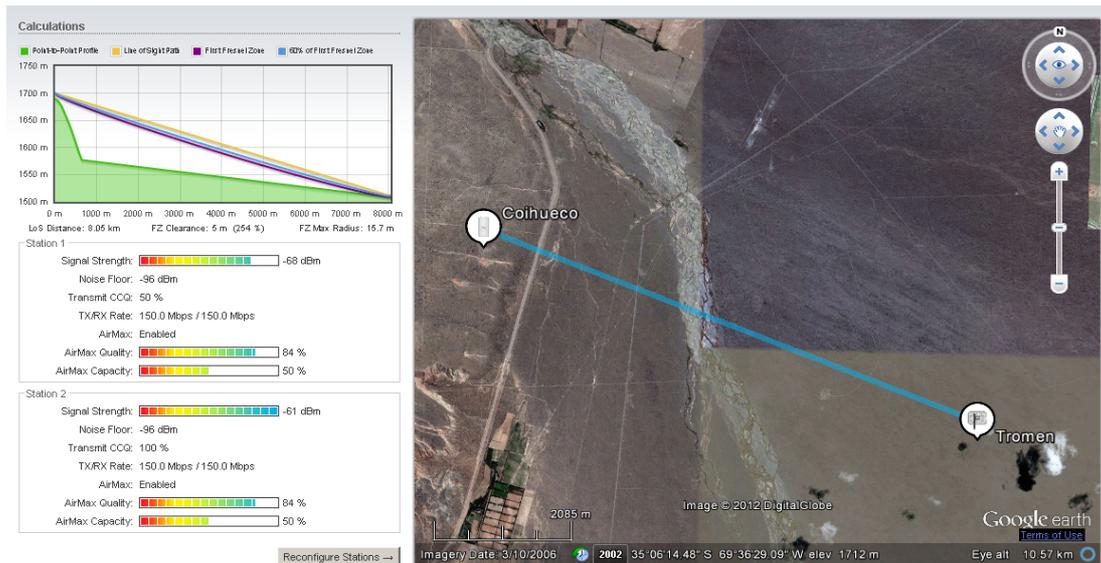
**Figura 4.6:** Enlace entre Coihueco y el tanque 0736 (Feche). Se observa la ubicación en mapa tanto del coordinador en Coihueco como del suscriptor; el perfil del terreno entre ambos, así como también las diferentes zonas de Fresnel del enlace en cuestión.

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación Airlink outdoor wireless link calculator, propietaria de Ubiquiti Networks



**Figura 4.7:** Enlace entre Coihueco y el tanque 0695 (Rosalia). Se observa la ubicación en mapa tanto del coordinador en Coihueco como del suscriptor, el perfil del terreno entre ambos, así como también las diferentes zonas de Fresnel del enlace en cuestión.

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación Airlink outdoor wireless link calculator, propietaria de Ubiquiti Networks



**Figura 4.8:** Enlace entre Coihueco y el tanque 0663 (Tromen). Se observa la ubicación en mapa tanto del coordinador en Coihueco como del suscriptor, el perfil del terreno entre ambos, así como también las diferentes zonas de Fresnel del enlace en cuestión.

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación Airlink outdoor wireless link calculator, propietaria de Ubiquiti Networks

## ***Conclusiones teóricas***

El tanque detector perteneciente al infill más cercano al coordinador en Coihueco se encuentra a 3 km del mismo, mientras que el tanque detector más alejado (que es Feche) está a 9 km de distancia. Por otro lado el tanque detector más alejado hacia el norte es Rosalía, mientras que el más alejado hacia el sur es Tromen, ambos a una distancia aproximada de 8 km de Coihueco. Basados en estas características geográficas, estos 3 tanques detectores formaron parte de la selección para los cálculos teóricos y pruebas de campo.

Analizando los resultados de las simulaciones y cálculos realizados con la aplicación AirLink outdoor wireless link calculator, observamos que para los enlaces de Rosalía y Tromen las potencias de la señal recibida es de -68 dBm en el coordinador y -61 dBm en el suscriptor, mientras que para el enlace de Feche las potencias de la señal recibida es de -69 dBm en el coordinador y -62 dBm en el suscriptor.

Siendo estos 3 detectores los peores casos por ser los más alejados del coordinador en Coihueco, y teniendo en cuenta que los equipos de radio seleccionados pueden trabajar con un mínimo nivel de señal de recepción de -90 dBm, podemos afirmar que la implementación de enlaces entre Coihueco y cualquier ubicación dentro del infill es factible utilizando la tecnología seleccionada, en relación a la distancia y la topografía del lugar.

## *CAPITULO 5: Pruebas y mediciones de campo*

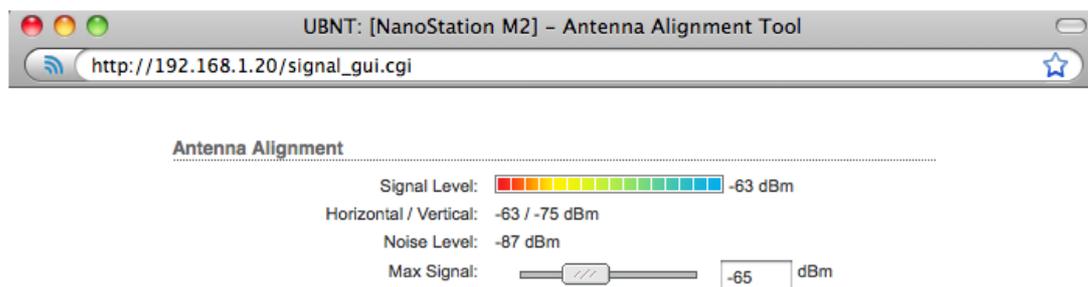
El objetivo de la realización de pruebas de los enlaces era medir parámetros de comunicaciones tales como máximo throughput de tráfico TCP/IP y tasa de errores o paquetes perdidos. Por otro lado, era muy conveniente realizar alguna prueba que generando un tráfico muy similar al que utilizaría el sistema real de AMIGA.

Para poder cumplir estos objetivos, el equipo de radio Ubiquiti Rocket M2 (coordinador) se instaló en forma fija en Coihueco, mientras que el equipo de radio Ubiquiti Airgrid M2 (suscriptor) que fue instalado y desinstalado sobre 5 diferentes tanques detectores dentro del infill de AMIGA. A continuación se describen las pruebas realizadas.

### *Alineación de antenas*

Antes de proceder con las pruebas de comunicaciones se realizó la alineación de la antena mediante el software incorporado en el equipo denominado “Antenna Alignment tool”. Esta herramienta, que es propietaria de Ubiquiti Networks, permite apuntar la antena en la dirección de máxima señal [Figura 5.1], lo cual hace más eficiente al enlace. Por otro lado nos permite conocer el nivel del ruido recibido.

El proceso de alineación consiste en simplemente ir moviendo la antena hasta que el nivel de señal indicado por la herramienta sea el máximo.



**Figura 5.1:** *Alineación de antenas*

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación *Antenna Alignment tool*, propietaria de Ubiquiti Networks

## ***Frame Aggregation***

Una parte del estándar IEEE 802.11 permite el envío de múltiples frames por un único acceso al medio combinando dichos frames en uno más grande. Esta característica se denomina “frame aggregation” y logra el envío de múltiples frames consecutivos que tienen el mismo origen y destino bajo un mismo frame de MAC, obteniendo así una mejor tasa de transferencia efectiva.

Como los equipos de radio utilizados permiten la utilización de “frame aggregation”, se decidió realizar una prueba en un tanque detector, para poder comparar la tasa de transferencia tanto con esta característica activada como desactivada [**Tabla 6.1**].

Tanto para realizar esta prueba en particular, como para todas las pruebas cuyo objetivo es la medición de tasa máxima de tráfico TCP/IP, se utilizó el software denominado “Speed Test”, ya que el mismo está embebido en el firmware de los equipos de radio Rocket M2 y Airgrid M2, y por lo tanto es posible medir la tasa de transferencia directamente a nivel de capa 3 de TCP/IP evitando así la necesidad de una aplicación externa.

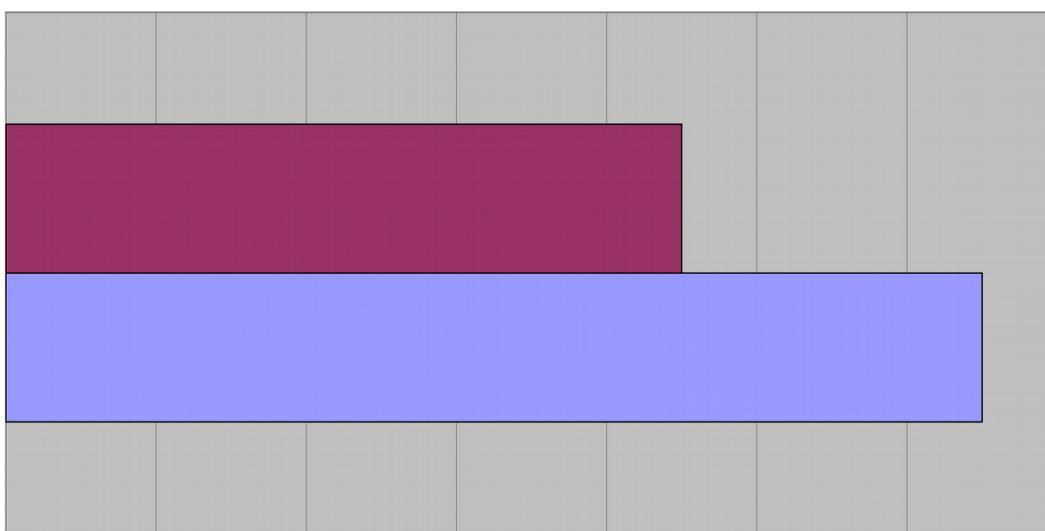
Tanque	distancia de Coihueco Km	nivel de señal dBm	TCP - max throughput (Speed test)	
			con aggregation (Mbps)	sin aggregation (Mbps)
Phil Collins	4,92	-56	6,5	4,5

**Tabla 5.1:** Resultados de tasa de transferencia máxima con la característica “Frame Aggregation” activada y desactivada

A través de esta prueba se evidenció que con la opción de aggregation activada, se logra una mejor eficiencia en la transmisión de datos hacia un mismo destino, y por lo tanto un mejor throughput de datos. [**Figura 5.2**]

Como cada tanque detector siempre se comunica con el mismo coordinador, o sea todos los paquetes tienen el mismo origen y destino, se entiende que la característica de Frame Aggregation aplica perfectamente al tráfico del observatorio.

A raíz de este resultado todas las consiguientes pruebas se realizaron con esta opción activada.



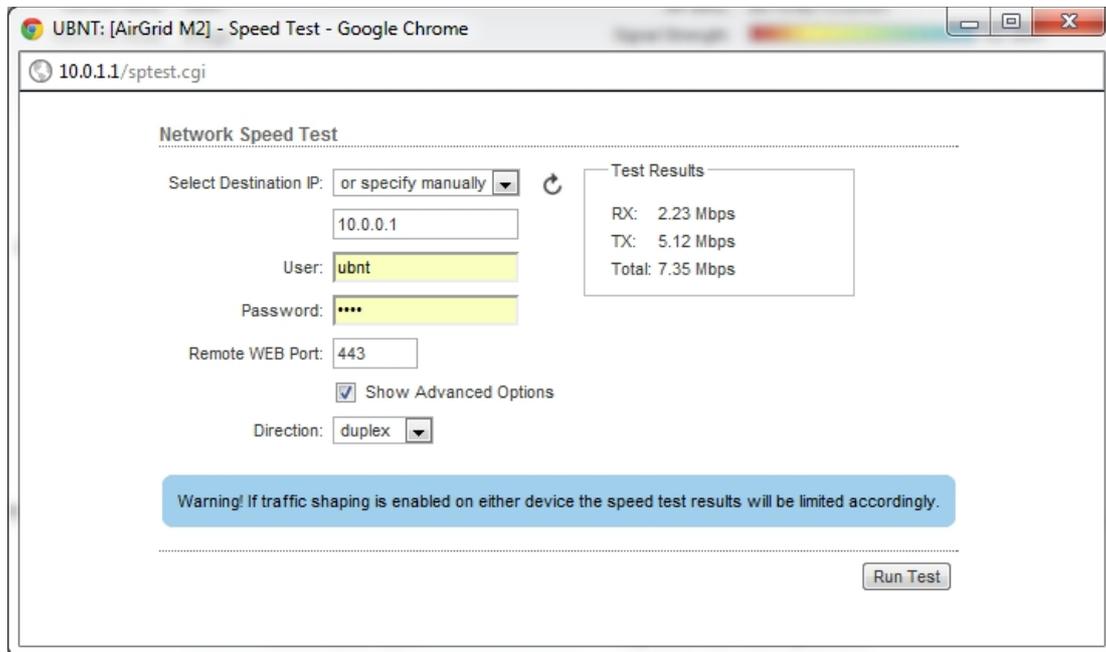
*Figura 5.2: Resultados de tasa de transferencia máxima con la característica “Frame Aggregation” activada y desactivada*

*Fuente: autoría propia*

### ***Prueba de tasa máxima de transferencia***

La primera prueba tenía como objetivo la medición de tasa máxima de tráfico TCP/IP. Para poder lograr esto, y tal como se mencionó y justificó anteriormente, se decidió utilizar el software denominado “Speed Test” embebido en el firmware de los equipos de radio Rocket M2 y Airgrid M2.

Con este software se logró medir la tasa máxima de transferencia de tráfico TCP entrante (RX), tráfico TCP saliente (TX) y tráfico TCP full-duplex (RX+TX) [Figura 5.3] para cada uno de los 5 enlaces que se implementaron para las pruebas de comunicaciones.



**Figura 5.3:** Medición de tasa máxima de transferencia de tráfico TCP entrante (RX), tráfico TCP saliente (TX) y tráfico TCP full-duplex (RX+TX)

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación *Speed Test*, propietaria de Ubiquiti Networks

A continuación [Tabla 5.2] se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el “Speed Test” embebido en los equipos de radio. En los mismos se observa la velocidad máxima de transferencia de recepción y de transmisión, tanto en modo half-duplex como full-duplex, así como la tasa de transferencia máxima total.

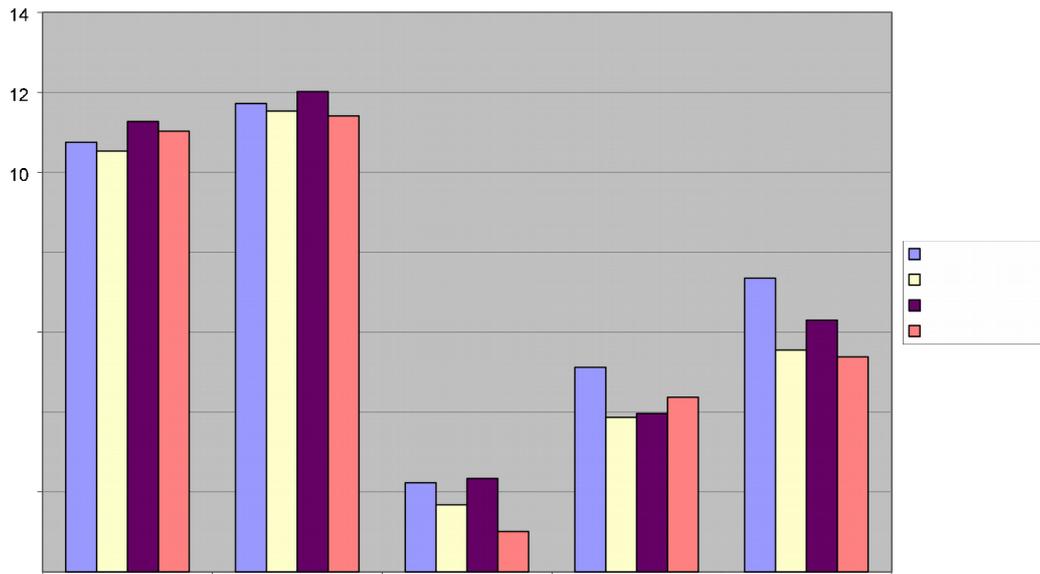
Tanque	distancia de Coihueco Km	nivel de señal dBm	TCP - max throughput (Speed test)				
			TCP RX (Mbps)	TCP TX (Mbps)	TCP Duplex RX (Mbps)	TCP Duplex TX (Mbps)	TCP Duplex total (Mbps)
Corrientes	4,54	-61	10,75	11,72	2,23	5,12	7,35
Phil Collins	4,92	-56					
Feche	9,03	-64	10,53	11,53	1,68	3,87	5,55
Rosalía (test1)	7,9	-68					
Rosalía (test2)	7,9	-62	11,27	12,02	2,34	3,96	6,3
Tromen	8,04	-62	11,03	11,41	1,01	4,37	5,38

*Tabla 5.2: Resultados de tasa de transferencia máxima utilizando Speed Test*

Cabe aclarar que no se tomaron en cuenta las mediciones tomadas con Speed Test en el tanque detector Phil Collins ya que las mismas no fueron realizadas con los mismos parámetros de pruebas que se utilizaron en los otros tanques detectores.

Por otro lado, en el tanque detector de Rosalía se repitieron las pruebas luego de mejorar una mejor alineación de la antena. Sólo se consideran las mediciones del segundo test.

Gracias a la buena alineación de la antena, en todos los tanques se logró un nivel de señal mejor a -65 dBm.



**Figura 5.4:** Resultados de tasa de transferencia máxima utilizando Speed Test

**Fuente:** autoría propia

Podemos observar en la [Figura 5.4] que en todos los casos se logró superar los 10 Mbps de velocidad de transferencia con tráfico TCP en modo half-duplex, mientras que en transmisión TCP full-duplex se obtuvo un promedio de 6 Mbps de throughput.

### ***Prueba de tasa de errores o paquetes perdidos***

La segunda prueba tenía como objetivo la medición de la tasa de errores o paquetes perdidos. Para poder lograr esto, se decidió utilizar una herramienta que permite medir el rendimiento entre los dos extremos de la comunicación, unidireccionalmente o bidireccionalmente. La herramienta seleccionada para tal propósito es IPERF [Ref.12], principalmente por las siguientes razones:

- Por un lado, IPERF permite la generación no sólo de paquetes TCP sino que también crea flujos de paquetes UDP. Esto es importante porque a diferencia de TCP, UDP no cuenta con un mecanismo de control de tráfico que realiza retransmisiones cuando hay errores o pérdidas de paquetes (o sea cuando no se recibe un ACK), y por lo tanto utilizando flujos de datos UDP se hace directa

la medición de paquetes perdidos simplemente comparando la cantidad de paquetes enviados con la cantidad de paquetes recibidos.

- Otro factor importante que favoreció la elección de IPERF sobre otras herramientas, es que se trata de un software de código abierto, de libre licencia y que puede ejecutarse en varias plataformas incluyendo Linux, Unix y Windows. El mismo fue escrito en C++ y desarrollado por el Distributed Applications Support Team (DAST) en el National Laboratory for Applied Network Research (NLNR).
- Finalmente, y no menos importante de destacar, IPERF utiliza métodos estándar en las mediciones de rendimiento de las redes, lo cual es útil para comparar la performance de diferentes enlaces de manera imparcial.

IPERF trabaja en modo cliente servidor y a su vez, tiene la flexibilidad de modificar varios parámetros del tráfico generado, como por ejemplo el tamaño de los paquetes.

Las pruebas se realizaron configurando IPERF en modo servidor en una notebook conectada al equipo de radio Rocket M2 (coordinador) en Coihueco. Por otro lado se configuró IPERF en modo cliente en otra notebook conectada al equipo de radio Airgrid M2 (suscriptor), el cual fue instalado sobre cada uno de los tanques detectores seleccionados para las pruebas.

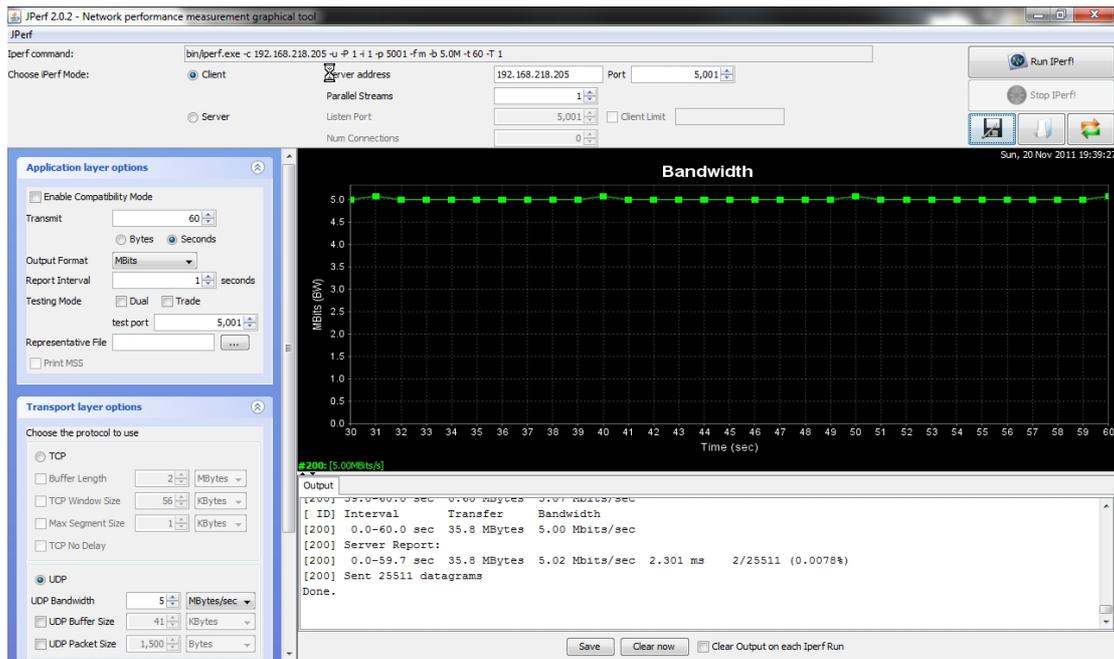
En el extremo servidor, IPERF se inicio con el siguiente comando:

***Iperf -s -u***

-s indica el modo “server”

-u indica que el tráfico a generar será con paquetes UDP

En el extremo cliente se utilizó el software JPERF [Figura 5.5] que no es más que una interfaz gráfica programada en Java para el IPERF, en donde se seleccionan todos los parámetros y se construye automáticamente la línea de comando. Adicionalmente JPERF muestra en forma gráfica los resultados de las pruebas.



**Figura 5.5:** Medición de errores o paquetes perdidos utilizando tráfico UDP

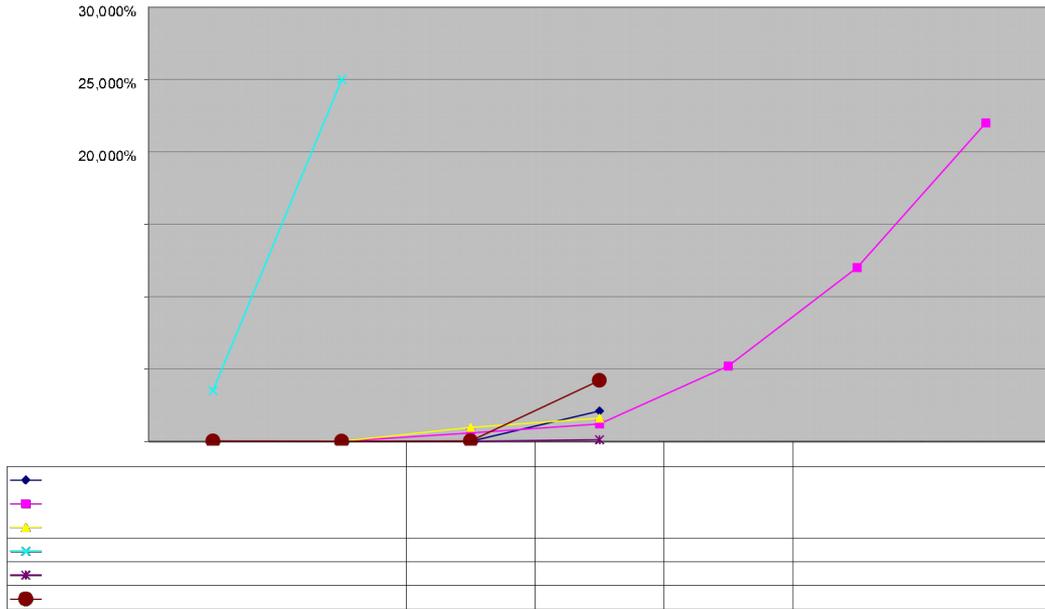
**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación IPERF / JPERF

A continuación [Tabla 5.3] se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el software IPERF.

Tanque	distancia de Coihueco Km	nivel de señal dBm	UDP - error rate (IPERF)						
			UDP 5 Mbp s	UDP 8 Mbps	UDP 10 Mbps	UDP 12 Mbps	UDP 13 Mbps	UDP 14 Mbps	UDP 15 Mbps
Corrientes Phil	4,54	-61	0,008 %	0,000 %	0,000 %	2,100 %			
Collins	4,92	-56	0,000 %	0,000 %	0,570 %	1,200 %	5,20 %	12,00 %	22,00 %
Feche Rosalía	9,03	-64	0,000 %	0,000 %	0,960 %	1,600 %			
(test1)	7,9	-68	3,50 %	25,00 %					
Rosalía (test2)	7,9	-62	0,000 %	0,003 %	0,004 %	0,110 %			
Tromen	8,04	-62	0,008 %	0,000 %	0,020 %	4,200 %			

**Tabla 5.3:** Resultados de tasa de transferencia máxima utilizando Speed Test

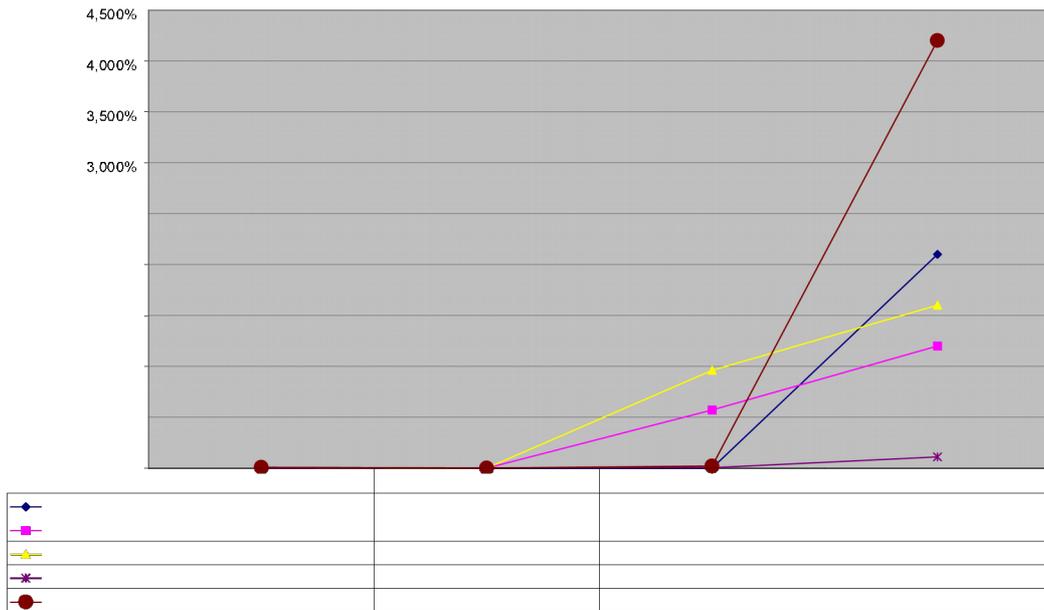
En el tanque Rosalía se observó que realizando las pruebas con las mínimas velocidades (5 Mbps y 8 Mbps), se obtenían porcentajes de paquetes perdidos demasiado elevados [Figura 5.6]. Por lo tanto se decidió volver a alinear la antena, mejorando el nivel de señal en 6dBm (pasó de -68 dBm a -62 dBm), y se volvieron a realizar los tests.



**Figura 5.6:** Resultados de tasa de errores utilizando tráfico UDP generado por el software IPERF

**Fuente:** autoría propia

El primer tanque en donde se realizaron los tests fue Phil Collins. Allí se comprobó que al superar los 10 Mbps de throughput de tráfico UDP, el porcentaje de paquetes perdidos aumentaba en forma casi exponencial. Por ese motivo se decidió limitar el resto de los tests a una tasa de 12 Mbps. [Figura 5.7]



**Figura 5.7:** Resultados de tasa de errores utilizando tráfico UDP (gráfico limitado a 12Mbps) generado por el software IPERF

**Fuente:** autoría propia

Se concluye que hasta un throughput de 8 Mbps, prácticamente no hay paquetes perdidos o con errores (con excepción de las mediciones en Rosalía). Por otro lado, aumentando el throughput a 10Mbps, el porcentaje de paquetes perdidos o con errores es inferior a 1% en todos los casos. Por último aumentando el throughput a 12 Mbps el porcentaje de errores es inferior al 5%.

### ***Simulador del tráfico real***

La tercer y última prueba tenía como objetivo simular un entorno de tráfico similar al real que utilizaría AMIGA. Para ello se desarrolló un generador de tráfico programado en C, el cual consta de un módulo servidor y otros 2 módulos clientes [Ref.13].

Este generador de tráfico simula una comunicación entre un suscriptor y un coordinador, generando tráfico de los siguientes tipos de paquetes:

- T2s enviados por suscriptor (primer módulo cliente)

- solicitudes de T3s enviado por coordinador (módulo servidor)
- T3s enviados por suscriptor (segundo módulo cliente)

Las pruebas se realizaron ejecutando el módulo servidor en una notebook conectada al equipo de radio Rocket M2 (coordinador) en Coihueco. Por otro lado se ejecutaron los 2 módulos clientes en otra notebook conectada al equipo de radio Airgrid M2 (suscriptor), el cual fue instalado sobre cada uno de los tanques detectores seleccionados para las pruebas.

Una vez ejecutados los 2 módulos clientes y el módulo servidor en las respectivas consolas se puede visualizar el estado del programa, cantidad de paquetes enviados, cantidad de paquetes recibidos, así como también los errores expresados en bytes (en el caso que un paquete de T3 llegue corrupto).

#### **Sintaxis para ejecutar el módulo servidor:**

```
./server <A> <B> <C> <D>
```

#### **Sintaxis para ejecutar el primer módulo cliente:**

```
./client <A> <B> <C>
```

#### **Sintaxis para ejecutar el segundo módulo cliente:**

```
./clientt3 <A> <B> <C>
```

#### **Descripción de parámetros:**

<A>: es la dirección IP de la computadora donde corre el módulo servidor. En caso del módulo servidor que simula las solicitudes de T3 esta dirección IP es la de la misma computadora donde se está ejecutando dicho módulo.

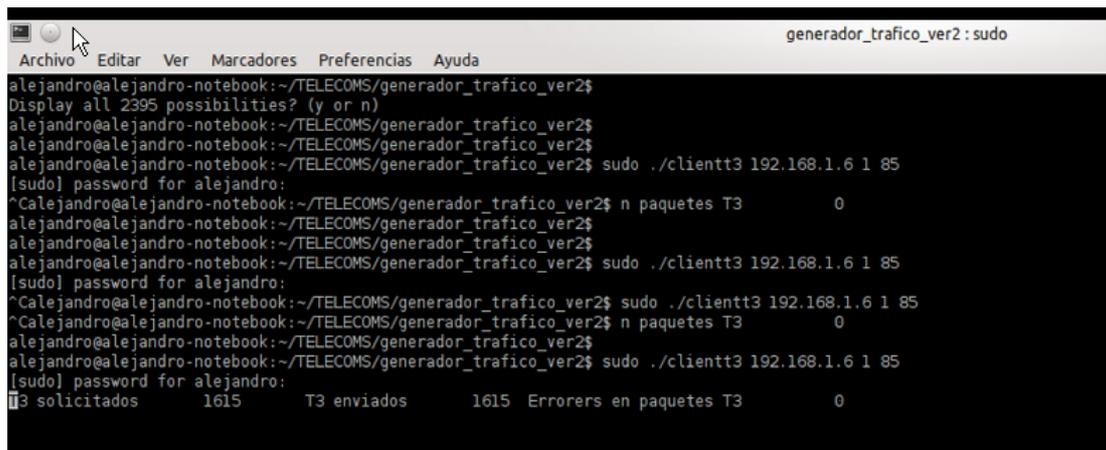
<B>: indica cual será el primer dígito del número de puerto TCP correspondiente al tráfico generado. El rango de valores posibles es de 1 a 65, mientras que el resto de los dígitos del número de puerto TCP son fijos y son los siguientes:

- 333 para el caso del módulo servidor que simula las solicitudes de T3
- 222 para el caso del primer módulo cliente que simula los paquetes de T2
- 111 para el caso del segundo módulo cliente que simula los paquetes de T3

<C>: es la cantidad de suscriptores que se van a simular.

<D>: es la frecuencia medida en segundos de los pedidos de T3.

Se puede ver un ejemplo de la ejecución del segundo módulo cliente en la [Figura 5.8]



```
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$
Display all 2395 possibilities? (y or n)
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ sudo ./clientt3 192.168.1.6 1 85
[sudo] password for alejandro:
^Calejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ n paquetes T3      0
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ sudo ./clientt3 192.168.1.6 1 85
[sudo] password for alejandro:
^Calejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ sudo ./clientt3 192.168.1.6 1 85
^Calejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ n paquetes T3      0
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$
alejandro@alejandros-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ sudo ./clientt3 192.168.1.6 1 85
[sudo] password for alejandro:
T3 solicitudes      1615      T3 enviados      1615      Errorers en paquetes T3      0
```

*Figura 5.8: Ejemplo de ejecución del segundo módulo cliente*

*Fuente: imagen obtenida por el módulo clientt3 del simulador de tráfico*

### **Puertos TCP utilizados:**

En las pruebas realizadas se simularon un total de 85 suscriptores y se utilizaron los siguientes puertos TCP:

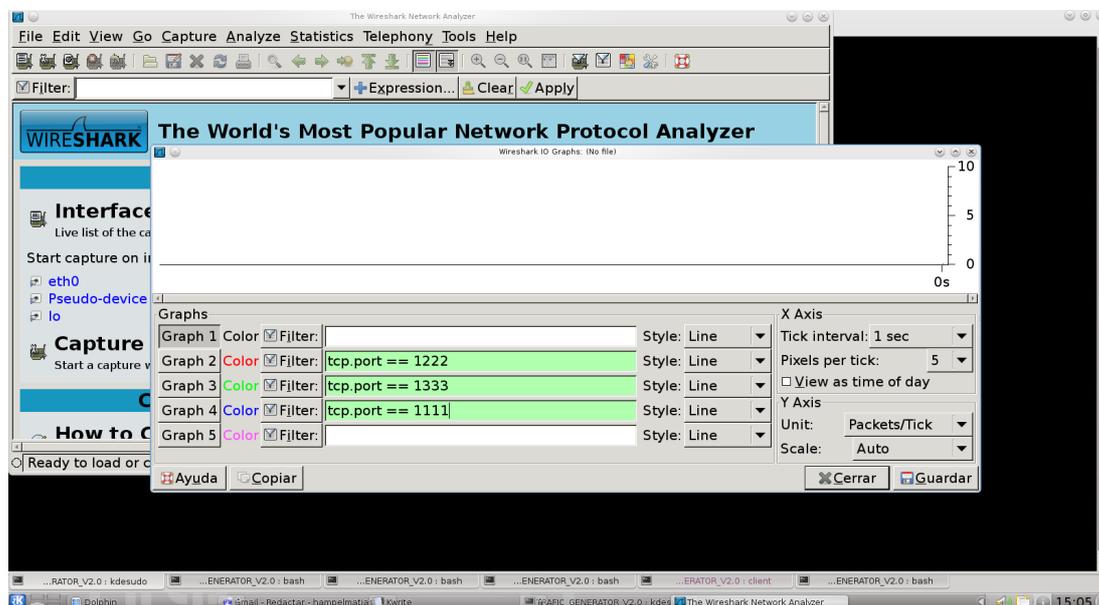
- 1222 para los paquetes de T2
- 1333 para los paquetes de solicitud de T3
- 1111 para los paquetes de T3

### Tamaños de los paquetes generados:

Los tamaños de los paquetes generados fueron los siguientes:

- Paquete de T2: 156 bytes
- Paquete de solicitud de T3: 300 bytes
- Paquete de T3: por cada solicitud de T3 se envían 64 paquetes de 1024 bits

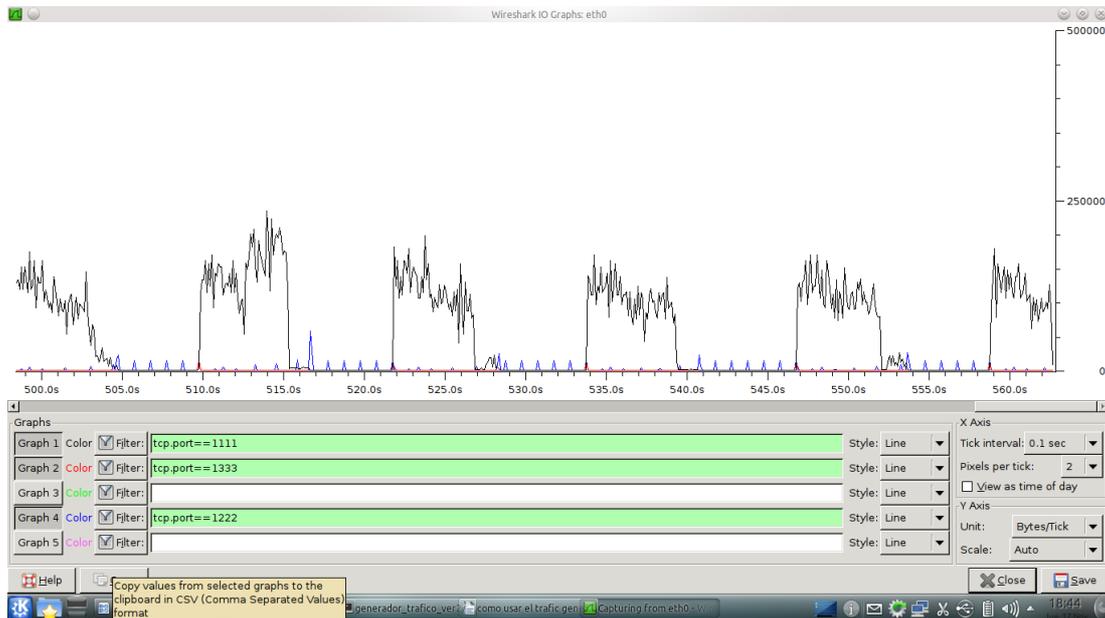
Se utilizó el software libre Wireshark [Ref.14] para capturar todo el tráfico de esta prueba, así como también para visualizar por separado los 3 tipos de paquetes (*T2*, *solicitudes de T3* y *T3*) intercambiados entre coordinador y suscriptor. Para realizar los gráficos correspondientes se utilizaron filtros que se muestran en la [Figura 5.9]



**Figura 5.9:** Filtros por puerto TCP

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación Wireshark

A cada filtro se le asignó un color diferente para poder distinguir los 3 tipos de tráfico [Figura 5.10].



**Figura 5.10:** Simulación de tráfico de paquetes de T2 (azul), solicitudes de paquetes de T3 (rojo) y paquetes de T3 (negro)

**Fuente:** imagen obtenida por la aplicación Wireshark

Debido a que el software genera tráfico TCP, en caso de existir errores o paquetes perdidos se producirán automáticamente retransmisiones TCP. Por tal motivo este software no detecto ningún error en ninguna prueba realizada.

Básicamente, la utilidad de este software fue probar en un entorno de test, que el sistema es capaz de transmitir y recibir un tráfico muy similar al que se necesitaría en el entorno de AMIGA.

A modo de ejemplo, las estadísticas medidas en el tanque detector Phil Collins muestran [Figura 5.11] que el módulo servidor realizó 5015 solicitudes de paquetes de T3, por lo que el módulo cliente envió los 5015 paquetes de T3 correspondientes. Finalmente el módulo servidor recibió esos 5015 paquetes de T3 sin producirse errores.

```
generador_trafico_ver2 : sudo
Archivo Editar Ver Marcadores Preferencias Ayuda
alejandro@alejandro-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ ls
client client.c client.c~ clientt3 clientt3.c clientt3.c~ server server.c server.c~
alejandro@alejandro-notebook:~/TELECOMS/generador_trafico_ver2$ sudo ./clientt3 192.168.1.6 1 85
[sudo] password for alejandro:
T3 solicitados      5015      T3 enviados      5015  Errores en paquetes T3      0
```

*Figura 5.11: Ejecución del segundo módulo cliente en donde se puede observar la cantidad de solicitudes de paquetes de T3 solicitados, la cantidad de paquetes de T3 enviados y la cantidad de errores.*

*Fuente: imagen obtenida por el módulo clientt3 del simulador de tráfico*

## *CAPITULO 6: Pruebas y mediciones adicionales*

Al resultar positivas las pruebas mencionadas en el capítulo anterior, para el siguiente año se decidió ampliar la infraestructura de telecomunicaciones de la siguiente manera:

El equipo de radio Rocket M2 de Ubiquiti con su antena de 15 dBi de ganancia que estaba funcionando como coordinador en Coihueco quedó dedicado para monitoreo del espectro.

En su reemplazo se colocaron 2 router boards RB493, cada uno con un equipo de radio R52nM de Mikrotik y su respectiva antena de 17 dBi de ganancia y 60° de apertura. Uno de ellos cumple la función de coordinador y por un tema de redundancia el otro está dedicado a ser backup.

El observatorio Pierre Auger otorgó un permiso para utilizar un canal WiFi en su capacidad completa, por lo que tanto el equipo de radio Rocket M2 como los R52nM se configuraron para que trabajen al máximo ancho de banda disponible para el canal WiFi asignado.

Del lado de los suscriptores, también se utilizaron router boards RB493, cada uno con un equipo de radio de bajo consumo R52nM de Mikrotik transmitiendo a una potencia máxima de 23 dBm con su respectiva antena de 20 dBi de ganancia. En esta oportunidad los equipos se implementaron en forma fija en los siguientes 8 tanques detectores:

- Kathy Turner
- Los Piojos
- Yeka
- Toune
- Heisenberg
- Tierra del Fuego
- Corrientes
- Phil Collins

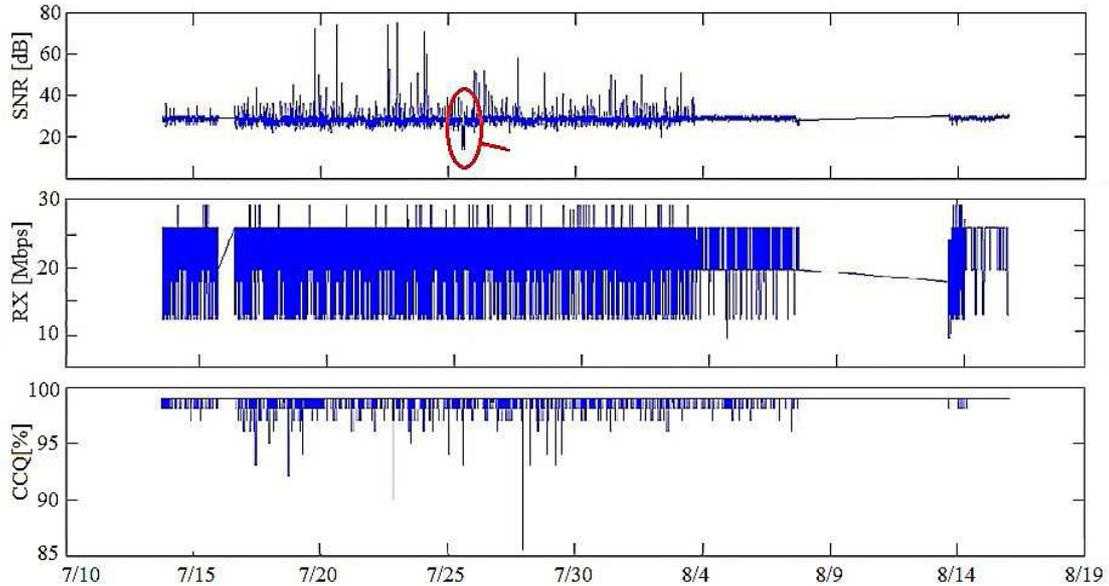
El consumo de energía utilizado para telecomunicaciones es aproximadamente 3 W por estación.

El router board RB493 interconecta a través de puertos ethernet, los módulos centelladores contadores de muones que se encuentran enterrados con una computadora SBC (Single Board Computer) TS7260 de Technologic Systems, y a su vez con el equipo de radio WiFi R52nM.

Con esta infraestructura de telecomunicaciones, y con el objetivo de verificar que el sistema es capaz de manejar al menos el tráfico de AMIGA, se realizaron las siguientes pruebas tanto en laboratorio como en campo:

### ***Prueba de relación señal a ruido***

Los valores de relación a ruido medidos en campo con 8 estaciones implementadas (7 con módulos centelladores contadores de muones funcionando y la octava estación emulaba datos de muones) tuvo un valor promedio de 30 dB. El sistema fue probado en presencia de una interferencia que redujo la relación señal a ruido a 15 dB sin afectar la tasa de transferencia máxima ni la tasa de pérdida de paquetes. Estos resultados se muestran en la [Figura 6.1]



**Figura 6.1:** Resultado de las pruebas de campo registrados durante Julio y Agosto de 2012. El primer panel muestra la relación señal a ruido en dB (con óvalo rojo se destaca el momento en donde se introdujo una interferencia). Por otro lado, el segundo panel muestra la tasa de transferencia de recepción medida en Mbps, mientras que el tercer panel muestra el CCQ (Client Connection Quality), el cuál es explicado más adelante.

**Fuente:** publicación 2013\_JINST\_8\_P12014

## **Prueba de tasa de transferencia**

Las pruebas de tasa de transferencia fueron hechas en laboratorio con los mismos equipos instalados en campo (descritos al inicio de este capítulo) usando un coordinador y un suscriptor. Ocupando un canal WiFi a capacidad completa, se enviaron 90 paquetes de 200 bytes por segundo en forma continua durante 2 horas. Esta configuración intenta simular un escenario en donde 90 contadores de muones están enviando datos en forma simultánea.

Los resultados de este test mostraron un tiempo de retardo máximo de 2.2 ms utilizando una tasa de transferencia de alrededor de 25 Mbps.

Luego, en el campo se realizaron pruebas similares a las que se hicieron en laboratorio, esta vez utilizando un coordinador y las 8 estaciones suscriptoras ya implementadas. Los datos generados por cada una de las estaciones fue enviado 12 veces para emular un escenario similar al realizado en el laboratorio con un coordinador y un único receptor. La tasa de transferencia obtenida durante este período de tiempo produjo resultados muy similares a los obtenidos en laboratorio, o sea aproximadamente 25 Mbps por estación y un retardo máximo de 6 ms. Este resultado se logró usando un sistema de coordinación basado en DCF (Distributed Coordination Function) [Ref.16]. Estos resultados se muestran en el segundo panel de la [Figura 6.1].

### ***Pruebas de pérdida de datos y tasa de paquetes con error***

Para poder cuantificar la tasa de paquetes con error, y como el protocolo utilizado para transmitir datos (TCP/IP) asegura la correcta transferencia de datos a través de retransmisiones, se utilizó el índice Client Connection Quality (CCQ) que es un promedio ponderado de las relaciones  $T_{\min} / T_{\text{real}}$ , que son calculados para cada paquete transmitido, en donde:

- $T_{\min}$ : es el tiempo que tomaría en transmitirse un cierto paquete a la máxima tasa de transferencia sin retransmisiones
- $T_{\text{real}}$ : es el tiempo que tomó en transmitirse el paquete en la vida real (o sea teniendo en cuenta los tiempos de retransmisión si los hubo).

Con 8 estaciones implementadas y utilizando un acceso DCF, se obtuvieron resultados de CCQ entre 98% y 85%. Esto no significa que hubo pérdida de datos, pero al usar un sistema de coordinación basado en DCF, algunos de los paquetes debieron ser retransmitidos. Esto será revisado en la prueba de Coordinador de Red y los resultados se muestran en el tercer panel de la [Figura 6.1].

## ***Prueba de consumo de energía***

Aún cuando el hardware utilizado tiene una base de consumo de energía de 3 W, este valor se incrementa con cada uno de los puertos ethernet en el router board que se utilicen. Para 6 puertos ethernet en uso, el consumo de energía es de 4.8 W, y a la máxima capacidad que son 9 puertos ethernet, el consume de energía pasa a ser 5.7 W. Por lo tanto, para no exceder el presupuesto energético de 5 W, se pueden conectar como máximo 5 módulos centelladores (cada uno conectado a través de un puerto ethernet) y una SBC al router board.

## ***Prueba de uptime***

El hardware de telecomunicaciones de AMIGA estuvo funcionando en el campo desde mayo 2012 hasta octubre 2013 (cuando se escribió este informe) sin ninguna falla. El gap de datos observado entre 8/8 y 8/14 en la **[Figura 6.1]** corresponde a una falla del enlace de telecomunicaciones desde Malargüe hasta el edificio de Coihueco, tiempo durante el cual no se registraron datos en el campus de Auger. La transmisión de datos fue retomada una vez que se recuperó dicho enlace.

## ***Prueba de coordinador de red y su efecto en pérdida de datos***

El sistema de coordinador de red fue probado bajo las siguientes 2 modalidades de operación:

- **802.11g:** aquí se utiliza CSS (carrier sensing system) [Ref.16] para detectar cuando el canal está siendo utilizado, o sea un sistema DCF (Distributed Coordination Function)

- **802.11n:** en este caso se utiliza un sistema de polling [Ref.17] para asignar a cada suscriptor el uso exclusivo del canal durante una ventana de tiempo dada, o sea un sistema PCF (Point Coordination Function)

Para comparar ambos sistemas DCF y PCF, se diseñó un escenario de prueba utilizando las 8 estaciones instaladas para tener una situación similar a la que se encontraría en operación normal de 85 o más detectores trabajando simultáneamente en el campo. Con el objetivo de simular el peor escenario, que es cuando un grupo de detectores tratan de acceder al canal simultáneamente para poder enviar sus datos de muones (al recibir una solicitud de T3), se configuró para que cada uno de los 8 detectores repita 12 veces la información de muones a transmitirse. De esta manera, con 8 estaciones implementadas es posible simular un escenario que podría encontrarse con 96 estaciones en total.

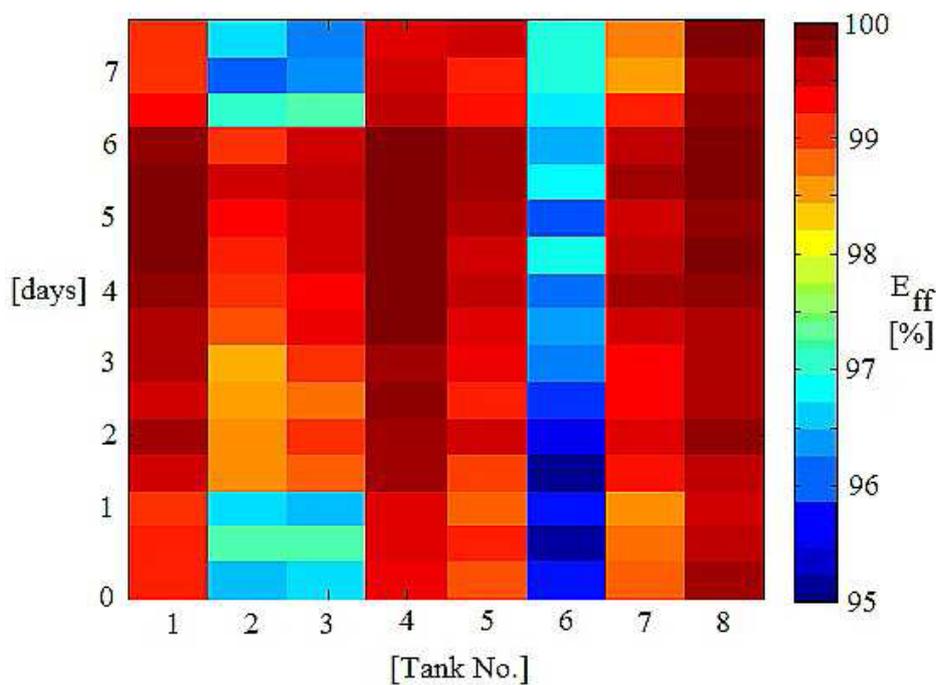
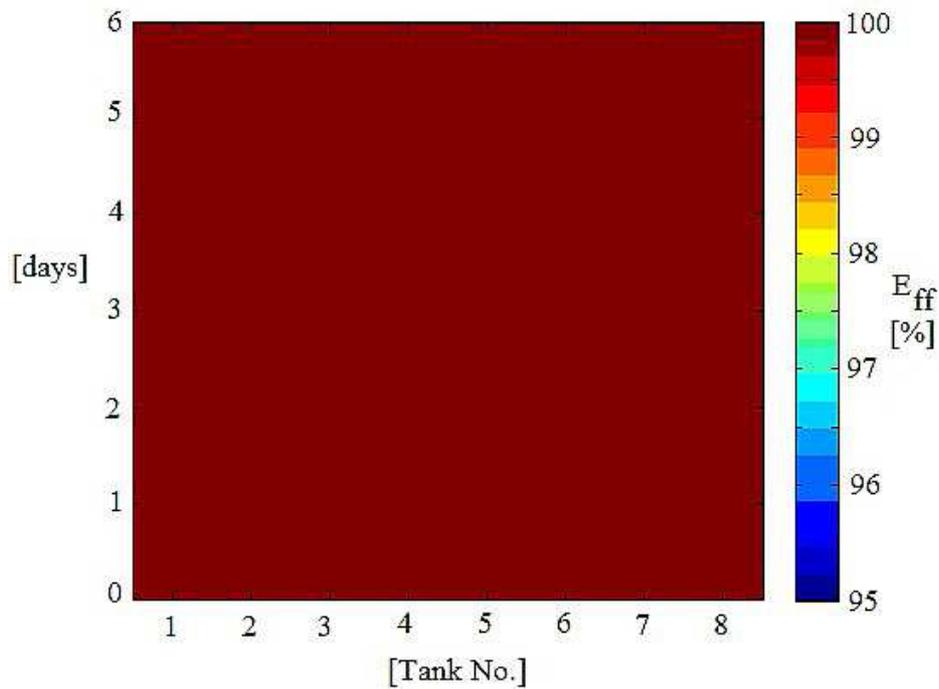
En cada estación, se modificó el software de los SBC para que utilice UDP en lugar de TCP, y para que envíe 12 paquetes consecutivos de información de 150 bytes cada uno por cada solicitud de T3 que reciba dicha estación. El motivo de elegir UDP es para evitar la retransmisiones que se producen utilizando TCP, y de esta manera permitir que se produzcan pérdida de paquetes y consecuentemente comparar ambos sistemas de acceso utilizando este parámetro. Considerando los encabezados de los protocolos de todas las capas, el tamaño final del paquete fue de 192 bytes.

Esta prueba fue realizada durante una semana para cada sistema y todos los paquetes UDP fueron registrados en una computadora localizada en el campus Auger en Malargüe. Finalmente la eficiencia en la transmisión de datos (Eff) se calculó como el cociente entre el número de paquetes recibidos (Nr) y el número total de paquetes enviados (Ntot):

$$Eff = \frac{Nr}{Ntot}$$

Los resultados de estas pruebas se presentan en la **[Figura 6.2]**, donde puede observarse que el sistema PCF tiene una Eff = 100% mientras que el sistema DCF

presenta pérdida de paquetes en todas las estaciones. Este resultado muestra que el sistema PCF puede asegurar una coordinación exitosa en la comunicación TCP/IP, resolviendo el problema del nodo oculto. Por otro lado, el sistema DCF provocaría que se produzcan retransmisiones debido a las colisiones en el uso del canal, dando lugar a posibles colapsos de la red ante una gran cantidad de suscriptores. Esta situación no podría ocurrir con el sistema PCF ya que éste dedica el uso exclusivo del canal a cada suscriptor cada cierto tiempo, el cual es mucho menor que el retardo permitido para la transferencia de datos ante las solicitudes de T2 y T3.



**Figura 6.2:** Gráficas de  $Eff$  para el sistema de acceso PCF del estándar IEEE 802.11n (panel superior) y para el sistema de acceso DCF del estándar IEEE 802.11g (panel inferior). El eje  $y$  es el tiempo transcurrido durante las pruebas, mientras que el eje  $x$  es el número de estación. La escala de colores es  $Eff$  en porcentaje.

**Fuente:** publicación 2013\_JINST\_8\_P12014

## *CAPITULO 7: Conclusiones*

Se demostró que el sistema de telecomunicaciones propuesto originalmente, utilizando el estándar IEEE 802.15.4 no es capaz de satisfacer los requisitos mínimos de AMIGA.

Alternativamente se presentó y probó un sistema de telecomunicaciones a ser implementado para AMIGA por medio de una red punto a multipunto con un canal WiFi en la banda de 2.4 Ghz utilizando su máxima capacidad.

El hardware utilizado probó ser muy confiable, ya que funcionó sin fallas durante 1 año de pruebas bajo condiciones de campo con los climas que se encuentran en Malagüe. Adicionalmente, dicho hardware probó ser intercambiable por otros modelos de equipos que trabajan bajo el estándar IEEE 802.11 (n y g), lo cual era un resultado deseado de AMIGA para poder tener independencia de hardware.

Los resultados mostraron que el estándar IEEE 802.11n es el más adecuado para la transferencia de información de muones desde los módulos centelladores hasta el CDAS (Central Data Acquisition System), obteniendo una eficiencia del 100% en dicha transferencia.

Finalmente, las pruebas de relación señal a ruido, tasa de transferencia, consumo de energía, pérdida de paquetes y uptime mostraron que el hardware utilizado bajo el estándar IEEE 802.11 es suficiente para los requerimientos de AMIGA, y por lo tanto prueba ser una opción viable para futuras mejoras de AMIGA y del Observatorio Pierre Auger.

## *Referencias*

- [Ref.01] PIERRE AUGER collaboration, J. Abraham et al., Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory, [Nucl. Instrum. Meth. A 523 \(2004\) 50](#).
- [Ref.02] PIERRE AUGER collaboration, I. Allekotte et al., The surface detector system of the Pierre Auger Observatory, [Nucl. Instrum. Meth. A 586 \(2008\) 409](#).
- [Ref.03] PIERRE AUGER collaboration, J. Abraham et al., The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory, [Nucl. Instrum. Meth. A 620 \(2010\) 227](#) [[arXiv:0907.4282](#)].
- [Ref.04] PIERRE AUGER collaboration, A. Etchegoyen, AMIGA, Auger Muons and Infill for the Ground Array, in proceedings of the [30th International Cosmic Ray Conference](#), July 3–11, Mérida, México (2007).
- [Ref.05] A.D. Supanitsky et al., Underground muon counters as a tool for composition analyses, [Astropart. Phys. 29 \(2008\) 461](#) [[arXiv:0804.1068](#)]
- [Ref.06] PIERRE AUGER collaboration, M. Platino, AMIGA, Auger Muons and Infill for the Ground Array, in proceedings of the [31st International Cosmic Ray Conference](#), July 7–15, Łódz, Poland (2009).
- [Ref.07] PIERRE AUGER collaboration, P. Buchholz, Hardware developments for the AMIGA enhancement at the Pierre Auger Observatory, in proceedings of the [31st International Cosmic Ray Conference](#), July 7–15, Łódz, Poland (2009).
- [Ref.08] PIERRE AUGER collaboration, H. Klages, HEAT — Enhancement telescopes for the Pierre Auger Southern Observatory, in proceedings of the [30th International Cosmic Ray Conference](#), July 3–11, Mérida, México (2007).
- [Ref.09] PIERRE AUGER collaboration, M. Kleifges, Extension of the Pierre Auger Observatory using high-elevation fluorescence telescopes (HEAT), in proceedings of the [31st International Cosmic Ray Conference](#), July 7–15, Łódz, Poland (2009).

[Ref.10] PIERRE AUGER collaboration, J. Abraham et al., Trigger and aperture of the surface detector array of the Pierre Auger Observatory, [Nucl. Instrum. Meth. A 613 \(2010\) 29 \[arXiv:1111.6764\]](#).

[Ref.11] Ubiquiti Networks Inc., airLink outdoor wireless link calculator, <http://www.ubnt.com/airlink>

[Ref.12] IPERF

<http://sourceforge.net/projects/iperf/>

[Ref.13] Generador de tráfico programado por Matias Rolf Hampel

Código fuente:

<https://www.dropbox.com/sh/ish1anc00ipruzp/AADpeMtz5O6x21vgHq9C34Pxa?dl=0>

[Ref.14] Wireshark

<https://www.wireshark.org/>

[Ref.15] Planilla de cálculo para análisis de todos los tiempos del sistema de telecomunicaciones propuesto

<https://www.dropbox.com/s/x3sbplzxlykcgyc/calculos%20de%20tiempos%20usando%20802.15.4.ods?dl=0>

[Ref.16] 802.11g IEEE standard for information technology, [Institute of Electrical and Electronic Engineers \(2003\)](#).

[Ref.17] 802.11n IEEE standard for information technology, [Institute of Electrical and Electronic Engineers \(2009\)](#).

## *Apéndice A - AMIGA at the Auger observatory: the telecommunications system*

### **Publicación de la cual fui coautor**

#### **Autores:**

M. Platino<sup>a,1</sup>; M.R. Hampel<sup>a,c</sup>; P. Fischelew<sup>e</sup>; A. Almela<sup>a,c</sup>; A. Sedoski<sup>a,f</sup>; G. De La Vega<sup>b,d</sup>; M. Videla<sup>b,d</sup>; A. Lucero<sup>a</sup>; F. Suarez<sup>a</sup>; O. Wainberg<sup>a,c</sup>; D. Yelos<sup>b,d</sup>; A. Cancio<sup>b,d</sup>; B. Garcia<sup>b</sup> and A. Etchegoyen<sup>a,c</sup>

*a Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas (CNEA-CONICET-UNSAM),*

*Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499 (1650), San Martín, Buenos Aires, Argentina*

*b Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas Mendoza (CNEA, CONICET, UNSAM),*

*Observatorio Meteorológico, Parque General San Martín (5500), Mendoza, Argentina*

*c Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Argentina*

*d Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina*

*e Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina*

*f Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas, Buenos Aires, Argentina*

**1 Corresponding author.**

#### **Revista:**

Journal of Instrumentation

**Editorial:**

IOP PUBLISHING LTD

**PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB**

RECEIVED: *November 12, 2013*

ACCEPTED: *December 11, 2013*

PUBLISHED: *December 23, 2013*

**Título de la publicación:**

AMIGA at the Auger observatory: the telecommunications system

**Referencias:**

2013 JINST 8 P12014

doi:10.1088/1748-0221/8/12/P12014

**Claves de búsqueda:**

Data Handling; Large detector systems for particle and astroparticle physics; Trigger concepts and systems (hardware and software)

**Resumen:**

AMIGA is an extension of the Pierre Auger Observatory that will consist of 85 detector pairs, each one composed of a surface water-Cherenkov detector and a buried muon counter. Each muon counter has an area of 30 square meters and is made of scintillator strips, with doped optical fibers glued to them, which guide the light to 64 pixel photomultiplier tubes. The detector pairs are arranged at 433 m and 750 m array spacings. In this paper we present the telecommunications system designed to connect the muon counters with the central data processing system at the observatory campus in Malargüe. The telecommunications system consists of a point-to-multipoint radio link designed to connect the 85 muon counters or subscribers to two coordinators located at the Coihueco fluorescence detector building. The link provides TCP/IP remote access to the scintillator modules through router boards installed on each of the surface detectors of AMIGA. This setup provides a flexible LAN configuration for each muon counter connected to a WAN that links all the data generated by the muon counters and the surface detectors to the Central Data Acquisition System, or CDAS, at the observatory campus. We present the design parameters, the proposed telecommunications solution and the laboratory and field tests proposed to guarantee its functioning for the whole data traffic generated between each surface detector and muon counter in the AMIGA array and the CDAS.

**Enlace a la publicación:**

[https://www.dropbox.com/s/lk20g8o6k97zg5d/2013\\_JINST\\_8\\_P12014%20.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/lk20g8o6k97zg5d/2013_JINST_8_P12014%20.pdf?dl=0)

## Apéndice B - Especificaciones técnicas del Rocket M2



System Information		
Processor Specs	Atheros MIPS 24KC, 400MHz	
Memory Information	64MB SDRAM, 8MB Flash	
	M	M GPS
Networking Interface	1 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45) Ethernet	2 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45) Ethernet

Regulatory / Compliance Information			
	M900, M2, M5, M2 GPS, M5 GPS	M3	M365, M365 GPS
Wireless Approvals	FCC Part 15.247, IC RS210, CE	-	FCC Part 90Z
RoHS Compliance	YES		

Physical / Electrical / Environmental		
Enclosure Size	17 x 8 x 3cm (length, width, height)	
Weight	0.5kg	
Enclosure Characteristics	Outdoor UV Stabilized Plastic	
Mounting Kit	Pole Mounting Kit included	
Power Supply	24V, 1A POE Supply included	
Power Method	Passive Power over Ethernet (pairs 4, 5+; 7, 8 return)	
Operating Temperature	-30C to 75C	
Operating Humidity	5 to 95% Condensing	
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4	
	M	M GPS
RF Connector	2x RP-SMA (Waterproof)	2x RP-SMA and 1x SMA (Waterproof)
	M (Except M5), M GPS (Except M5 GPS)	M5, M5 GPS
Max Power Consumption	6.5 Watts	8 Watts

Compatible Antennas				
M900	M2, M2 GPS	M3	M365, M365 GPS	M5, M5 GPS
AirMax Sector 900M-13-120	AirMax Sector 2G-16-90 2G-15-120	AirMax Sector 3G-18-120	AirMax Sector 3G-18-120	AirMax Sector 5G-17-90 5G-16-120 5G-20-90 5G-19-120
	Rocket Dish 2G-24	Rocket Dish 3G-26	Rocket Dish 3G-26	Rocket Dish 5G-30 5G-34

Operating Frequency Summary (MHz)				
M900	M2, M2 GPS	M3	M365, M365 GPS	M5, M5 GPS
902-928	2412-2462	3400-3700	3650-3675	5470-5825*

Rocket M2 / M2 GPS - Operating Frequency 2412-2462 MHz

OUTPUT POWER: 28 dBm

2.4 GHz TX POWER SPECIFICATIONS				2.4 GHz RX POWER SPECIFICATIONS			
	DataRate	Avg. TX	Tolerance		DataRate	Avg. TX	Tolerance
11g	1-24 Mbps	28 dBm	+/- 2 dB	11g	1-24 Mbps	-97 dBm min	+/- 2 dB
	36 Mbps	26 dBm	+/- 2 dB		36 Mbps	-80 dBm	+/- 2 dB
	48 Mbps	25 dBm	+/- 2 dB		48 Mbps	-77 dBm	+/- 2 dB
	54 Mbps	24 dBm	+/- 2 dB		54 Mbps	-75 dBm	+/- 2 dB
11n / AirMax	MCS0	28 dBm	+/- 2 dB	11n / AirMax	MCS0	-96 dBm	+/- 2 dB
	MCS1	28 dBm	+/- 2 dB		MCS1	-95 dBm	+/- 2 dB
	MCS2	28 dBm	+/- 2 dB		MCS2	-92 dBm	+/- 2 dB
	MCS3	28 dBm	+/- 2 dB		MCS3	-90 dBm	+/- 2 dB
	MCS4	27 dBm	+/- 2 dB		MCS4	-86 dBm	+/- 2 dB
	MCS5	25 dBm	+/- 2 dB		MCS5	-83 dBm	+/- 2 dB
	MCS6	23 dBm	+/- 2 dB		MCS6	-77 dBm	+/- 2 dB
	MCS7	22 dBm	+/- 2 dB		MCS7	-74 dBm	+/- 2 dB
	MCS8	28 dBm	+/- 2 dB		MCS8	-95 dBm	+/- 2 dB
	MCS9	28 dBm	+/- 2 dB		MCS9	-93 dBm	+/- 2 dB
	MCS10	28 dBm	+/- 2 dB		MCS10	-90 dBm	+/- 2 dB
	MCS11	28 dBm	+/- 2 dB		MCS11	-87 dBm	+/- 2 dB
	MCS12	27 dBm	+/- 2 dB		MCS12	-84 dBm	+/- 2 dB
	MCS13	25 dBm	+/- 2 dB		MCS13	-79 dBm	+/- 2 dB
	MCS14	23 dBm	+/- 2 dB		MCS14	-78 dBm	+/- 2 dB
MCS15	22 dBm	+/- 2 dB	MCS15	-75 dBm	+/- 2 dB		

## Apéndice C - Especificaciones técnicas del AirGrid M2

### System Information

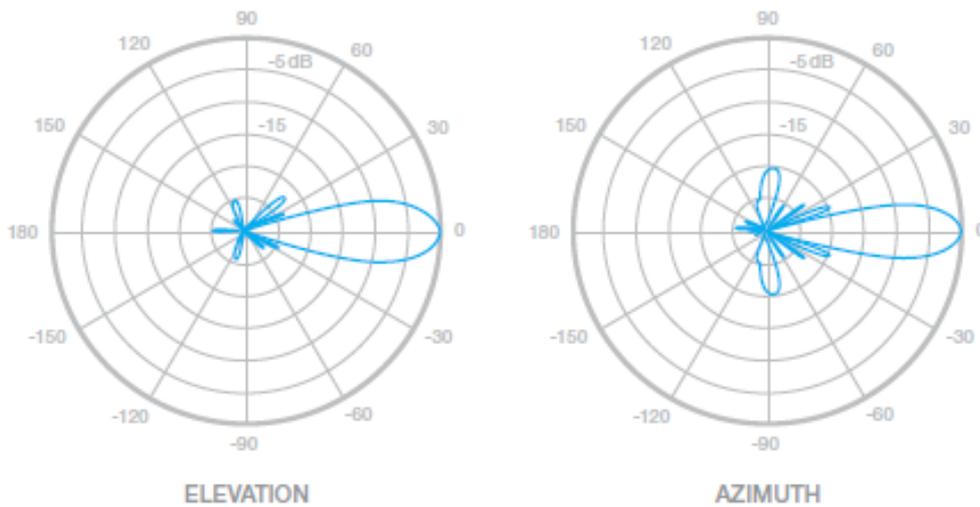
Processor Specs	Atheros MIPS 24KC, 400MHz
Memory Information	32MB SDRAM, 8MB Flash
Networking Interface	1 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45) Ethernet

### Regulatory / Compliance Information

Wireless Approvals	FCC Part 15.247, IC RS210, CE
RoHS Compliance	YES

Physical / Electrical / Environmental				
Enclosure Characteristics	Outdoor UV Stabilized Plastic			
Mounting Kit	Pole Mounting Kit included			
Power Supply	24V/0.5A POE Adapter (included)			
Max Power Consumption	3.0 Watts			
Power Method	Passive Power over Ethernet (pairs 4, 5+; 7, 8 return)			
Operating Temperature	-30C to 75C			
Operating Humidity	5 to 95% Condensing			
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4			
	FEED	MOUNT	11x14" REFLECTOR	17x24" REFLECTOR
Weight	0.2kg	0.65kg	0.8kg	1.9kg

### AIRGRID M2 HP - 17x24" - 20dBi



AirGrid M2 HP - Operating Frequency 2412-2462 MHz

OUTPUT POWER: 28 dBm

2.4 GHz TX POWER SPECIFICATIONS				2.4 GHz RX POWER SPECIFICATIONS			
	DataRate	Avg. TX	Tolerance		DataRate	Avg. TX	Tolerance
11g	1-24 Mbps	28 dBm	+/- 2 dB	11g	1-24 Mbps	-97 dBm min	+/- 2 dB
	36 Mbps	26 dBm	+/- 2 dB		36 Mbps	-80 dBm	+/- 2 dB
	48 Mbps	25 dBm	+/- 2 dB		48 Mbps	-77 dBm	+/- 2 dB
	54 Mbps	24 dBm	+/- 2 dB		54 Mbps	-75 dBm	+/- 2 dB
11n / AirMax	MCS0	28 dBm	+/- 2 dB	11n / AirMax	MCS0	-96 dBm	+/- 2 dB
	MCS1	28 dBm	+/- 2 dB		MCS1	-95 dBm	+/- 2 dB
	MCS2	28 dBm	+/- 2 dB		MCS2	-92 dBm	+/- 2 dB
	MCS3	28 dBm	+/- 2 dB		MCS3	-90 dBm	+/- 2 dB
	MCS4	27 dBm	+/- 2 dB		MCS4	-86 dBm	+/- 2 dB
	MCS5	25 dBm	+/- 2 dB		MCS5	-83 dBm	+/- 2 dB
	MCS6	23 dBm	+/- 2 dB		MCS6	-77 dBm	+/- 2 dB
	MCS7	22 dBm	+/- 2 dB		MCS7	-74 dBm	+/- 2 dB

## *Apéndice D - Resolución de la Secretaría de Comunicaciones 302/1998*

Esta resolución reglamenta la utilización de los sistemas de espectro ensanchado estableciendo ciertas especificaciones técnicas a cumplir. Entre las principales se destacan las siguientes por estar relacionadas con el presente trabajo de tesis:

- Potencia conducida de cresta máxima del transmisor:  
En las bandas de 2400 MHz a 2483,5 MHz y de 5725 MHz a 5850 MHz la potencia máxima es de 1 Watt.
- Ganancia de antena:  
En la banda de 2400 MHz a 2483,5 MHz, si la ganancia de antena supera los 6 dBi, debe reducirse 1 dB la potencia máxima del transmisor por cada 3 dB que dicha ganancia supere los 6 dBi.

Texto completo de la resolución:

**Secretaría de Comunicaciones**

**TELECOMUNICACIONES**

**Resolución 302/98**

**Modifícase la Resolución N° 3102/92-CNT, mediante la cual se reglamentó el uso de los Sistemas de Espectro Ensanchado.**

**Bs. As., 05/02/98.**

**B. O.: 11/02/98.**

VISTO el Expediente N° EXPCNC E.007477/97 del registro de la COMISION NACIONAL DE COMUNICACIONES, donde se documenta la necesidad de actualizar la normativa vigente para SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO, y

CONSIDERANDO:

Que por Resolución N° 3102 CNT/92 se reglamentó el uso de los SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO.

Que si bien estos sistemas por su técnica de funcionamiento y modalidad de operación permiten simplificar los procedimientos de gestión de frecuencia, la experiencia recogida indica que en algunos tipos de aplicación resulta necesario tomar recaudos a fin de evitar interferencias.

Que en el mercado surgieron nuevas variantes de los sistemas de espectro ensanchado.

Que la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos de América ha tomado medidas modificatorias en el mismo sentido para esta normativa.

Que la presente se dicta en uso de las atribuciones emergentes del Anexo II del Decreto N° 1620/96.

Por ello,

EL SECRETARIO

DE COMUNICACIONES

RESUELVE:

**Artículo 1°**- Sustitúyese el Anexo de la Resolución N° 3102 CNT/92, por el Anexo I a la presente.

**Art. 2°**- Regístrese, comuníquese, publíquese, dése a la Dirección Nacional del Registro Oficial y archívese. - Germán Kammerath.

ANEXO I

NORMA TECNICA CNC-92-63-01

SISTEMAS DE ESPECTRO ENSANCHADO

**1. ALCANCE**

Esta norma se aplica exclusivamente a sistemas del servicio fijo y sistemas con terminales móviles en espacios limitados.

## **2. DEFINICIONES**

### **2.1. Sistemas de secuencia directa**

Sistema de espectro ensanchado en el cual la portadora está modulada por un código de dispersión de alta velocidad y una corriente de datos de información. La secuencia del código de alta velocidad domina la "función demodulación" y es el causante directo del ensanchamiento de la señal transmitida.

### **2.2. Sistemas por salto de frecuencia**

Sistema de espectro ensanchado en el cual la portadora está modulada por información codificada convencionalmente originando una dispersión convencional de la energía de radiofrecuencia alrededor de la portadora. La frecuencia de portadora no es constante, sino que varía a intervalos fijos controlada por la secuencia de codificación. El gran ancho de banda empleado por este sistema no es requerido por la dispersión de la energía de radiofrecuencia alrededor de la portadora sino para acomodar la banda de frecuencias en la cual la frecuencia portadora puede saltar. En un sistema por salto de frecuencia se verifica que la distribución de los saltos a corto plazo aparenta ser aleatoria, mientras que la de largo plazo parece distribuida uniformemente en la banda de salto y que los saltos secuenciales están distribuidos aleatoriamente tanto en la dirección como en la magnitud del cambio de frecuencia.

## **3. BANDAS DE FRECUENCIAS**

902 MHz a 925 MHz.

2 400 MHz a 2 483,5 MHz.

5 725 MHz a 5 850 MHz.

## **4. CONDICIONES OPERATIVAS**

**4.1.** La operación del sistema está condicionada a no causar interferencia perjudicial a otros sistemas autorizados. Asimismo debe tolerar la interferencia proveniente de otros sistemas autorizados, contra la cual no estará protegido.

**4.2.** Se deberá suspender la operación de estos sistemas ante una denuncia de interferencia causada por las mismas y debidamente comprobada. La operación no podrá reanudarse hasta que se haya subsanado la interferencia en cuestión.

**4.3.** En los sistemas por salto de frecuencia esta permitido el empleo de inteligencia para posibilitar al sistema el reconocimiento de otros usuarios de la banda de manera que en forma individual e independiente elijan y adapten sus saltos de frecuencia a fin de no emitir en canales ocupados. En los sistemas por salto de frecuencia esta prohibida cualquier otra forma de coordinación de frecuencias con el expreso propósito de evitar la ocupación simultánea de frecuencias de salto individuales por transmisores múltiples.

## **5. HOMOLOGACION DE LOS EQUIPOS**

Los equipos deberán estar inscriptos en los registros específicos de la Comisión Nacional de Comunicaciones.

## **6. AUTORIZACION**

### **6.1. Sistemas de espectro ensanchado para enlaces fijos punto a punto**

La autorización de los sistemas de espectro ensanchado para enlaces fijos punto a punto estará a cargo de la Gerencia de Ingeniería de la Comisión Nacional de Comunicaciones y deberá cumplir con el procedimiento general vigente que se aplica para la autorización de enlaces fijos punto a punto.

### **6.2. Otros enlaces para sistemas de espectro ensanchado**

La operación de estos sistemas quedará sujeta a la autorización pertinente mediante la presentación de la documentación necesaria para tal efecto (ver Apéndice II).

## **7. REQUERIMIENTOS RADIOELECTRICOS DE LOS EQUIPOS**

### **7.1. Potencia conducida de cresta máxima del transmisor**

#### **7.1.1. Sistemas de secuencia directa**

1 W, con las limitaciones impuestas en 7.2.1.2.

#### **7.1.2. Sistemas por salto de frecuencia**

#### **7.1.2.1. Banda de 902 MHz a 928 MHz**

1 W para sistemas con 50 o más frecuencias de salto

0,25 W para sistemas con 25 a 49 frecuencias de salto.

#### **7.1.2.2. Bandas de 2 400 MHz a 2 483,5 MHz y 5 725 MHz a 5 850 MHz**

1 W, con las limitaciones impuestas en 7.2.1.2.

### **7.2. Ganancia de antena**

#### **7.2.1. Sistemas de espectro ensanchado para enlaces fijos punto a punto**

##### **7.2.1.1. Banda a 902 MHz a 928 MHz**

La ganancia de antena será tal que la potencia aparente radiada máxima de cresta no supere los 6 dBW

##### **7.2.1.2. Banda de 2 400 MHz a 2 483,5 MHz**

Si la ganancia de antena supera los 6 dBi, debe reducirse 1 dB la potencia máxima del transmisor por cada 3 dB que dicha ganancia supere los 6 dBi

##### **7.2.1.3. Banda de 5 725 MHz a 5 850 MHz.**

La ganancia de antena puede superar los 6 dBi sin que sea preciso reducir la potencia máxima del transmisor.

#### **7.2.2. Otros enlaces de espectro ensanchado**

La ganancia de antena será tal que la potencia aparente radiada máxima de cresta no supere los 6 dBW

### **7.3. Sistemas de secuencia directa**

#### **7.3.1. Anchura de banda de la emisión**

No menor de 500 kHz para atenuación de 6 dB

#### **7.3.2. Densidad de potencia de cresta transmitida**

No debe exceder de 8 dBm para cualquier banda de 3 kHz, dentro del espectro de emisión y en cualquier intervalo de transmisión continua.

### **7.3.3. Ganancia de procesamiento**

Será como mínimo de 10 dB.

## **7.4. Sistemas por salto de frecuencia**

### **7.4.1. Anchura de banda del canal de salto**

#### **7.4.1.1. Banda de 902 MHz a 928 MHz**

El ancho de banda a 20 dB del canal de salto no será mayor de 500 kHz.

#### **7.4.1.2. Bandas de 2 400 MHz a 2 483,5 MHz y 5 725 MHz a 5 850 MHz**

El ancho de banda a 20 dB del canal de salto no será mayor de 1 MHz

### **7.4.2. Cantidad de frecuencias de salto y tiempo de permanencia en las mismas.**

El tiempo de permanencia promedio sobre cada frecuencia de salto debe ser igual para todas.

Los sistemas por salto de frecuencia no están obligados a utilizar todos los canales de salto disponibles en cada emisión. No obstante si la entrada del sistema citado es una señal continua de datos debe cumplir con todos los requisitos exigidos por esta norma.

Los sistemas que emiten ráfagas cortas deben cumplir con la definición de Sistemas por Salto de Frecuencia y distribuir sus emisiones en por lo menos la cantidad mínima de canales especificados más adelante.

#### **7.4.2.1. Banda de 902 MHz a 928 MHz**

Si el ancho de banda a 20 dB del canal de salto fuese menor a 250 kHz el sistema no utilizará menos de 50 frecuencias de salto y el tiempo de permanencia promedio no será mayor de 0,4 segundos dentro de un lapso de 20 segundos.

Si el ancho de banda a 20 dB del canal de salto fuese mayor o igual a 250 kHz del sistema no utilizará menos de 25 frecuencias de salto y el tiempo de permanencia promedio no será mayor de 0,4 segundos dentro de un lapso de 10 segundos.

#### **7.4.2.2. Bandas de 2 400 MHz a 2 483,5 MHz y 5 725 MHz a 5 850 MHz**

El sistema utilizará no menos de 75 frecuencias de salto y el tiempo de permanencia promedio no será mayor de 0,4 segundos dentro de un lapso de 30 segundos.

#### **7.4.3. Separación de canales**

Los canales estarán separados entre sí por lo menos 25 kHz o el ancho de banda a 20 dB, el que resulte de mayor valor.

#### **7.5. Sistemas híbridos**

Los sistemas híbridos son los que emplean una combinación de modulación de secuencia directa y modulación por salto de frecuencia y su ganancia de procesamiento derivada de la combinación de técnicas debe ser por lo menos 17 dB. El tiempo promedio de permanencia en cada frecuencia de la sección por salto de frecuencia operando sola, no será mayor a 0,4 segundos dentro de un lapso igual a la cantidad de frecuencias de salto multiplicadas por 0,4. La sección de secuencia directa operando sola deberá cumplir con la densidad de potencia de cresta especificada en 7.3.2.

#### **7.6. Emisiones no deseadas**

##### **7.6.1. Emisiones fuera de banda**

La potencia en cualquier banda de 100 kHz fuera de la de operación del transmisor deberá estar atenuada por lo menos 20 dB respecto de la comprendida en igual intervalo dentro de la banda que contiene el mayor nivel dentro de la banda deseada o bien lo requerido en 7.6.2., la menor atenuación de ambas.

##### **7.6.2. Emisiones no esenciales.**

Deberán ajustarse a lo establecido por el Reglamento de Radiocomunicaciones en el Apéndice 8.

## APÉNDICE I

### INFORME TECNICO

Para la inscripción en el Registro de Equipos, se adjuntará a la documentación técnica y administrativa solicitada, un informe con la medición de los parámetros especificados y descripciones adicionales.

1. Potencia conducida de cresta máxima del transmisor.
2. Potencia aparente radiada máxima de cresta.
3. Gráfico del ancho de banda ocupado con resolución espectral de 100 kHz.
4. Gráfico de emisiones no deseadas en todo el espectro hasta por lo menos la primera armónica de la emisión fundamental, medido con resolución espectral de 100 kHz. Los gráficos espectrales deben presentar los niveles de señal en valor absoluto, constando el ancho de banda de resolución utilizado, la banda barrida y la velocidad de barrido.

#### 5. Sistemas de secuencia directa.

- 5.1. Gráfico de densidad de potencia con resolución espectral de 3 kHz.

#### 5.2. Ganancia de procesamiento

Se determinará el cociente en dB entre las relaciones de señal a ruido con el sistema de ensanchamiento activado y desactivado respectivamente, medidas en la salida demodulada del receptor.

Cuando no sea posible medir la ganancia de procesamiento por dificultades de orden práctico, éstas deberán explicarse claramente. En tal caso será necesario presentar una descripción detallada del proceso de ensanchamiento que permita deducir la ganancia de procesamiento del equipo.

#### 6. Sistemas por salto de frecuencia.

- 6.1. Descripción detallada del proceso de ensanchamiento.

- 6.2. Anchura de banda del canal de salto.

6.3. Cantidad de frecuencias de salto y tiempo de permanencia en las mismas.

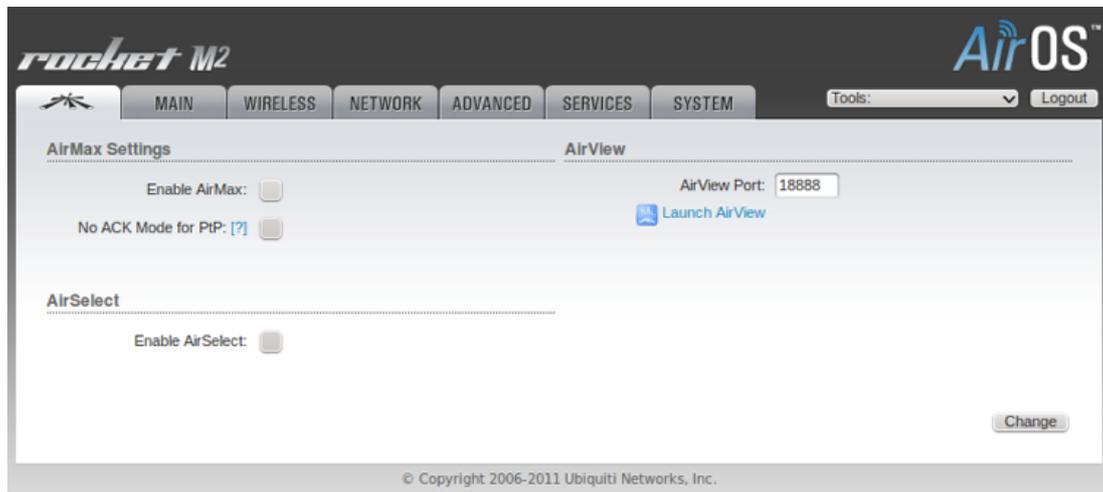
6.4. Separación de canales.

6.5. Frecuencias extremas de salto.

6.6. Tiempo empleado en cada secuencia pseudoaleatoria.

## *Apéndice E - Configuración del equipo Rocket M2:*

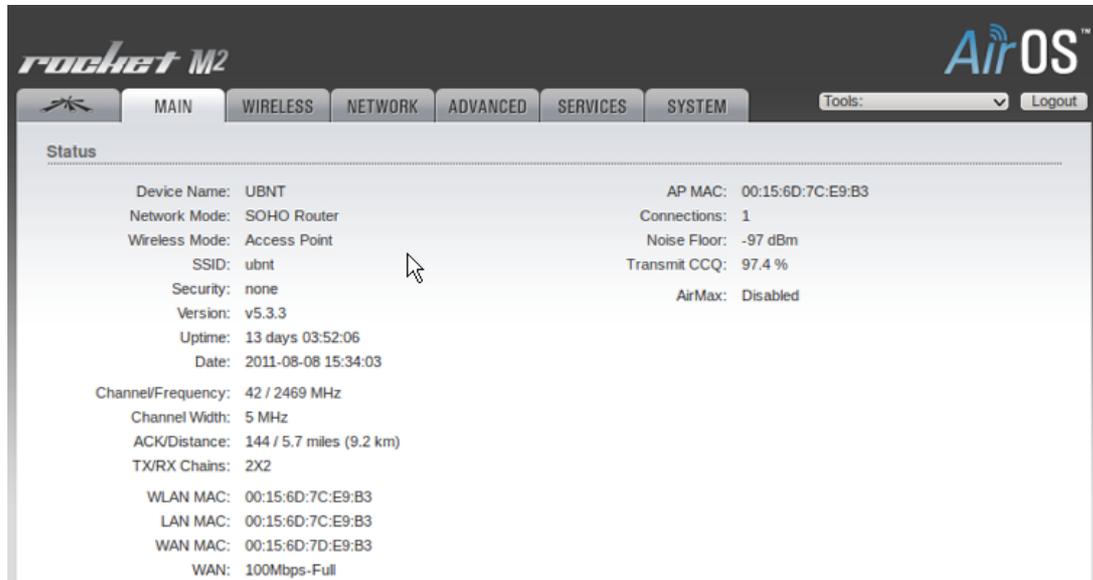
### *AirMax*



AirMax es una tecnología propietaria de Ubiquiti, la cual consiste en realizar un polling TDMA (time division multiple access). Esta tecnología presenta una mejor tolerancia a interferencias y permite incrementar el número de clientes WiFi que se pueden asociar al access point. Airmax trabaja asignando un slot de tiempo a cada cliente, eliminando el problema del “nodo escondido”. También ofrece capacidades de QoS (quality of service) dando distintas prioridades a distintos clientes (asignándoles más slots de tiempo). Obviamente los clientes deben soportar esta tecnología para asociarse al access point con esta función activada.

Se decidió no utilizar la tecnología AirMax por ser una solución propietaria. En este proyecto se intenta siempre utilizar soluciones basadas en estándares.

## Sección Main:



En esta sección podemos ver distintas informaciones acerca del equipo. Las que más nos interesan son las siguientes:

El modo de funcionamiento WiFi es Access Point

El SSID es ubnt

La frecuencia utilizada es 2469 MHz trabajando a  $\frac{1}{4}$  de tasa (5 Mhz)

La MAC address del access point es 00:15:6D:7C:E9:B3

La cantidad de clientes asociados es 1

El nivel del piso de ruido es de -97 dBm

La calidad del enlace o CCQ (client connection quality) es 97.4% (100% representa un enlace perfecto).

La versión del firmware es 5.3.3 (fue actualizado previo a la instalación del equipo)

La funcionalidad Airmax está desactivada

## Sección Wireless:

The screenshot shows the 'Basic Wireless Settings' page in the Rocket M2 AirOS web interface. The page has a navigation bar with tabs for MAIN, WIRELESS, NETWORK, ADVANCED, SERVICES, and SYSTEM. The 'WIRELESS' tab is selected. The settings are as follows:

- Wireless Mode: Access Point
- SSID: ubnt
- Hide SSID:
- Country Code: Argentina
- IEEE 802.11 Mode: B/G/N mixed
- Channel Width: 5 MHz
- Channel Shifting: Enabled
- Frequency, MHz: 2469
- Extension Channel: None
- Frequency List, MHz:  Enabled
- Auto Adjust to EIRP Limit:
- Antenna Gain: 16 dBi
- Cable Loss: 0 dB
- Output Power: 26 dBm
- Max TX Rate, Mbps: MCS 15 - 32.5
- Automatic:

Below the basic settings is the 'Wireless Security' section:

- Security: none
- MAC ACL:  Enabled

En esta sección se configuró lo siguiente:

El modo wireless se seteo en "Access Point"

Se puso el nombre "ubnt" para el SSID

Se fijó la frecuencia en 2469 MHz trabajando a 1/4 de tasa (5 Mhz)

Se colocó el valor de ganancia de la antena (16 dBi) según las especificaciones técnicas del Rocket M2. La pérdida por cable se dejó en 0 dB, ya que la longitud del mismo no es considerable.

La potencia de salida se limitó a 26 dBm para cumplir con las normas de la CNC

Se tildó la opción "Automatic" referido a la máxima velocidad de transmisión. Esto permite que si en determinado momento la calidad de enlace cae, entonces los errores

se incrementarán y consecuentemente el equipo disminuirá automáticamente la velocidad de transmisión para así reducir la cantidad de errores a niveles normales.

### ***Sección Network:***

The screenshot shows the 'Network' configuration page in the Rocket M2 AirOS web interface. The page is titled 'Network Role' and 'WAN Network Settings'. The 'Network Mode' is set to 'SOHO Router' and 'Disable Network' is set to 'None'. Under 'WAN Network Settings', the 'WAN IP Address' is set to 'Static' with a value of '192.168.218.44'. The 'Netmask' is '255.255.255.0', 'Gateway IP' is '192.168.218.100', 'Primary DNS IP' is '192.168.218.100', and 'Secondary DNS IP' is '168.96.148.1'. The 'MTU' is set to '1500'. There are checkboxes for 'Enable DMZ', 'Auto IP Aliasing', and 'Change MAC Address', all of which are currently unchecked. An 'IP Aliases' section has a 'Configure...' button.

**rocket M2** **AirOS™**

MAIN WIRELESS **NETWORK** ADVANCED SERVICES SYSTEM Tools: [v] Logout

**Network Role**

Network Mode: SOHO Router [v]  
Disable Network: None [v]

**WAN Network Settings**

WAN IP Address:  DHCP  PPPoE  Static  
IP Address: 192.168.218.44  
Netmask: 255.255.255.0  
Gateway IP: 192.168.218.100  
Primary DNS IP: 192.168.218.100  
Secondary DNS IP: 168.96.148.1  
MTU: 1500  
Enable DMZ:   
Auto IP Aliasing:   
IP Aliases: [Configure...](#)  
Change MAC Address:

### LAN Network Settings

IP Address:

Netmask:

Enable NAT:

Enable NAT Protocol:  SIP  PPTP  FTP  RTSP

MTU:

Enable DHCP Server:

Port Forwarding:  [Configure...](#)

Auto IP Aliasing:

IP Aliases: [Configure...](#)

### VLAN Network Settings

Enable VLAN:

### Multicast Routing Settings

Enable Multicast Routing:

Multicast Upstream:

### Firewall Settings

Enable Firewall:  [Configure...](#)

### Static Routes

Static Routes: [Configure...](#)

## Sección Advanced:

The screenshot shows the 'Advanced Wireless Settings' and 'Advanced Ethernet Settings' sections of the Rocket M2 AirOS web interface. The 'Advanced Wireless Settings' section includes fields for RTS Threshold (2346, Off), Fragmentation Threshold (2346, Off), Distance (6.9 miles / 11.1 km), ACK Timeout (157, Auto Adjust), Aggregation (Enable, 32 Frames, 50000 Bytes), Multicast Data (Allow All), Enable Installer EIRP Control (checked), Enable Extra Reporting (checked), Enable Client Isolation (unchecked), and Sensitivity Threshold, dBm (-96, Off). The 'Advanced Ethernet Settings' section includes Enable Autonegotiation (checked), Link Speed, Mbps (100), and Enable Full Duplex (checked).

**rocket M2** **AirOS™**

MAIN WIRELESS NETWORK **ADVANCED** SERVICES SYSTEM Tools:  Logout

---

**Advanced Wireless Settings**

RTS Threshold:   Off

Fragmentation Threshold:   Off

Distance:  6.9 miles (11.1 km)

ACK Timeout:   Auto Adjust

Aggregation:  Enable  
 Frames  Bytes

Multicast Data:  Allow All

Enable Installer EIRP Control:

Enable Extra Reporting:

Enable Client Isolation:

Sensitivity Threshold, dBm:   Off

---

**Advanced Ethernet Settings**

Enable Autonegotiation:

Link Speed, Mbps:

Enable Full Duplex:

## Sección Services:

The screenshot displays the configuration page for services on a Rocket M2 device running AirOS. The interface is divided into several sections, each with its own set of configuration options.

**Navigation and Header:** The top navigation bar includes tabs for MAIN, WIRELESS, NETWORK, ADVANCED, SERVICES (selected), and SYSTEM. The AirOS logo is in the top right corner, along with a Tools dropdown menu and a Logout button.

**Services Configuration:**

- Ping Watchdog:**
  - Enable Ping Watchdog:
  - IP Address To Ping:
  - Ping Interval: 300 seconds
  - Startup Delay: 300 seconds
  - Failure Count To Reboot: 3
- SNMP Agent:**
  - Enable SNMP Agent:
  - SNMP Community: public
  - Contact:
  - Location:
- Web Server:**
  - Use Secure Connection (HTTPS):
  - Secure Server Port: 443
  - Server Port: 80
  - Session Timeout: 15 minutes
- SSH Server:**
  - Enable SSH Server:
  - Server Port: 22
  - Enable Password Authentication:
  - Authorized Keys:
- Telnet Server:**
  - Enable Telnet Server:
  - Server Port: 23
- NTP Client:**
  - Enable NTP Client:
  - NTP Server:
- Dynamic DNS:**
  - Enable Dynamic DNS:
  - Host Name:
- System Log:**
  - Enable Log:
  - Enable Remote Log:

The configuration page is repeated, showing a second instance of the Web Server, SSH Server, Telnet Server, NTP Client, Dynamic DNS, and System Log sections. In this second instance, the Dynamic DNS section includes Username and Password fields, and the System Log section includes Remote Log IP Address and Remote Log Port (514) fields.

**Device Discovery:**

- Enable Discovery:

## Sección System:

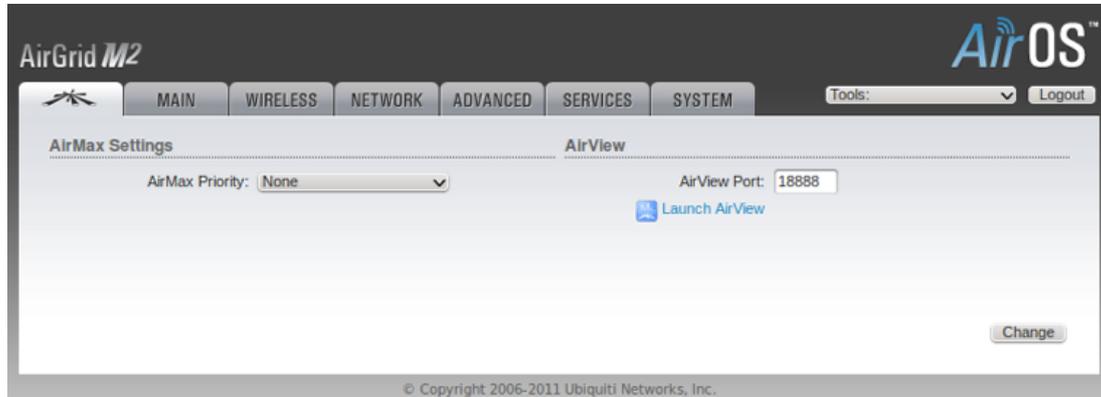
The screenshot shows a web interface for system configuration. At the top, there is a navigation menu with tabs: MAIN, WIRELESS, NETWORK, ADVANCED, SERVICES, and SYSTEM (which is selected). To the right of the menu are 'Tools:' and 'Logout' buttons. The main content area is divided into several sections:

- Device**: Contains 'Device Name' (text input with 'UBNT') and 'Interface Language' (dropdown menu with 'English').
- Date Settings**: Contains 'Timezone' (dropdown menu with '(GMT-03:00) Greenland'), 'Enable Startup Date' (checkbox), and 'Startup Date' (calendar icon).
- System Accounts**: Contains 'Administrator Username' (text input with 'ubnt' and a search icon) and 'Enable Read-Only Account' (checkbox).
- Miscellaneous**: Contains 'Enable Reset Button' (checkbox, checked).
- Location**: Contains 'Latitude' and 'Longitude' (text input fields).

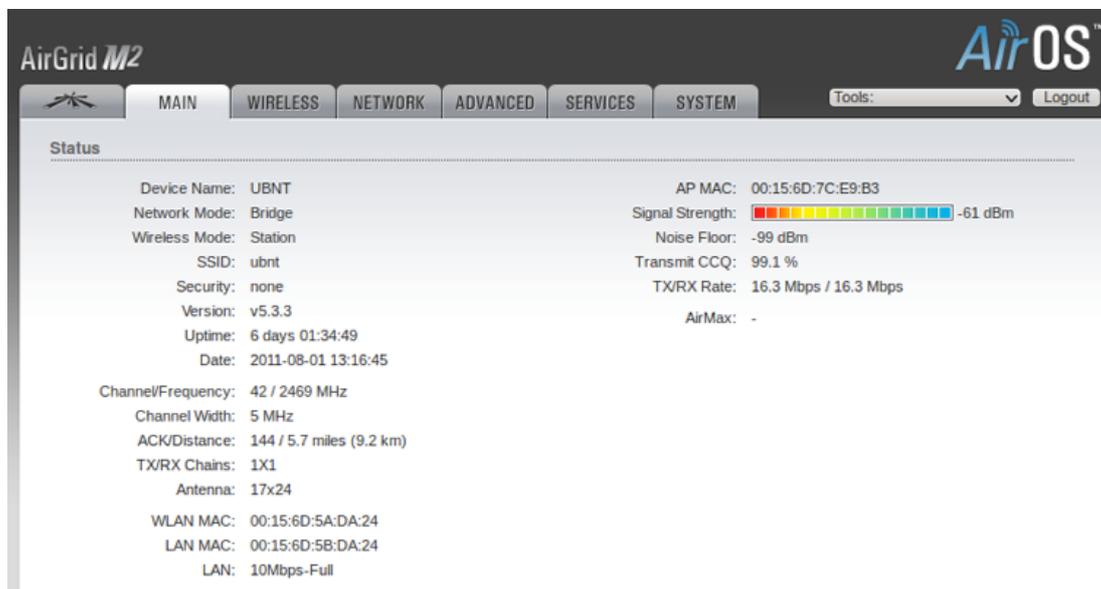
At the bottom of the main content area, there is a 'Change' button. Below this is the **Configuration Management** section, which includes 'Backup Configuration' (with a 'Download...' button) and 'Upload Configuration' (with a text input field, an 'Examiner...' button, and an 'Upload' button). The **Device Maintenance** section at the very bottom displays 'Firmware Version: XM.v5.3.3' and 'Build Number: 9634'.

## Apéndice F - Configuración del equipo Ubiquiti

### AirGrid M2



### Sección Main:



## Sección Wireless:

**AirGrid M2** **AirOS™**

MAIN WIRELESS NETWORK ADVANCED SERVICES SYSTEM Tools: [v] Logout

---

**Basic Wireless Settings**

Wireless Mode: [?] Station [v]  
SSID: ubnt [input] Select...  
Lock to AP MAC: [input]  
Country Code: Argentina [v]  
IEEE 802.11 Mode: B/G/N mixed [v]  
Channel Width: [?] 5 MHz [v]  
Channel Shifting: [?] Enabled [v]  
Frequency Scan List, MHz:  Enabled [input type="text" value="2469"] Edit...  
Auto Adjust to EIRP Limit:   
Antenna: 17x24 - 20 dBi [v]  
Output Power: [slider] 20 dBm  
Max TX Rate, Mbps: MCS 7 - 16.25 [v]  Automatic

---

**Wireless Security**

Security: none [v]

Change

© Copyright 2006-2011 Ubiquiti Networks, Inc.

## Sección Network:

The screenshot shows the 'Network' configuration page in the AirOS web interface. The page is titled 'AirGrid M2' and 'AirOS'. The navigation menu includes 'MAIN', 'WIRELESS', 'NETWORK', 'ADVANCED', 'SERVICES', and 'SYSTEM'. The 'NETWORK' tab is selected. The page is divided into three sections: 'Network Role', 'Network Settings', and 'VLAN Network Settings'.

**Network Role**

Network Mode:

Disable Network:

**Network Settings**

Bridge IP Address:  DHCP  Static

IP Address:

Netmask:

Gateway IP:

Primary DNS IP:

Secondary DNS IP:

MTU:

Spanning Tree Protocol:

Auto IP Aliasing:

IP Aliases:

**VLAN Network Settings**

Enable VLAN:

## Sección Advanced:

**AirGrid M2** **AirOS™**

MAIN WIRELESS NETWORK **ADVANCED** SERVICES SYSTEM Tools:  Logout

---

### Advanced Wireless Settings

RTS Threshold:   Off

Fragmentation Threshold:   Off

Distance:  2.3 miles (3.7 km)

ACK Timeout:   Auto Adjust

Aggregation:  Enable  
 Frames  Bytes

Multicast Data:  Allow All

Enable Installer EIRP Control:

Enable Extra Reporting:

Sensitivity Threshold, dBm:   Off

---

### Advanced Ethernet Settings

Enable Autonegotiation:

Link Speed, Mbps:

Enable Full Duplex:

## Sección Services:

The screenshot shows the 'Services' configuration page in the AirOS web interface. The page is divided into several sections for configuring different services:

- Ping Watchdog:** Includes checkboxes for 'Enable Ping Watchdog' (checked), 'IP Address To Ping' (10.0.0.1), 'Ping Interval' (60 seconds), 'Startup Delay' (180 seconds), and 'Failure Count To Reboot' (3).
- SNMP Agent:** Includes checkboxes for 'Enable SNMP Agent' (unchecked), 'SNMP Community' (public), 'Contact', and 'Location'.
- Web Server:** Includes checkboxes for 'Use Secure Connection (HTTPS)' (unchecked), 'Secure Server Port' (443), 'Server Port' (80), and 'Session Timeout' (15 minutes).
- SSH Server:** Includes checkboxes for 'Enable SSH Server' (checked), 'Server Port' (22), 'Enable Password Authentication' (checked), and 'Authorized Keys' (Edit...).
- Telnet Server:** Includes checkboxes for 'Enable Telnet Server' (unchecked) and 'Server Port' (23).
- NTP Client:** Includes checkboxes for 'Enable NTP Client' (unchecked) and 'NTP Server'.
- Dynamic DNS:** Includes checkboxes for 'Enable Dynamic DNS' (unchecked), 'Host Name', 'Username', 'Password' (with a Show button), 'Enable Log', 'Enable Remote Log', 'Remote Log IP Address', and 'Remote Log Port' (514).
- Device Discovery:** Includes a checkbox for 'Enable Discovery' (checked).

A 'Change' button is located at the bottom right of the configuration area. The footer of the page reads: © Copyright 2006-2011 Ubiquiti Networks, Inc.

## Sección System:

**AirGrid M2** **AirOS™**

MAIN WIRELESS NETWORK ADVANCED SERVICES **SYSTEM** Tools: [v] Logout

---

**Device** **Date Settings**

Device Name:  Timezone:   
Interface Language:  Enable Startup Date:   
Startup Date:

---

**System Accounts**

Administrator Username:    
Enable Read-Only Account:

---

**Miscellaneous** **Location**

Enable Reset Button:  Latitude:   
Longitude:

---

**Configuration Management**

Backup Configuration:   
Upload Configuration: