



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO DE RED INALÁMBRICA PARA SISTEMA DE  
CONDUCCIÓN Y DESCARGA DE EFLUENTES AL MAR DE  
COMPLEJO FORESTAL E INDUSTRIAL NUEVA ALDEA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELECTRICISTA

DANIEL ARTURO PINTO GUERRA

PROFESOR GUÍA:  
ALDO BOMBARDIERE ROSAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CLAUDIO ESTÉVEZ MONTERO  
MARIO ALDANA DOMÍNGUEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: DANIEL PINTO GUERRA

FECHA: JULIO 2016

PROF. GUÍA: ALDO BOMBARDIERE R.

“DISEÑO DE RED INALÁMBRICA PARA SISTEMA DE CONDUCCIÓN Y  
DESCARGA DE EFLUENTES AL MAR DE COMPLEJO FORESTAL E INDUSTRIAL  
NUEVA ALDEA”

Los sistemas de comunicación por radio han sido una de las herramientas más comunes para el apoyo de procesos productivos en el sector industrial. Estos sistemas permiten el desarrollo de soluciones a medida, que requieren estudios y diseños específicos por parte de especialistas y empresas del sector de las telecomunicaciones.

En este trabajo de memoria de título se ha desarrollado un proyecto de ingeniería que busca solucionar dificultades en las comunicación remotas necesarias para supervisar un sistema de descarga de efluentes emitidos por la planta Nueva Aldea, perteneciente a la compañía Arauco y Constitución S.A, ubicada en el km 21 de la ruta Itata, Región del Bío-Bío ( $36^{\circ}39'28.4''S, 72^{\circ}28'34.8''W$ ). Estas dificultades en las comunicaciones se producen debido a la falta de un sistema de comunicación dedicado (pues actualmente sólo se utiliza red pública celular) que permita una comunicación de voz, segura, confiable y en tiempo real, entre personal en planta y personal que realiza inspección en terreno del sistema de descarga que transporta los efluentes a través de 55 km, desde la planta al mar.

El estudio llevado a cabo, involucra la caracterización del problema, la definición de los requerimientos y limitaciones para el diseño, además de una revisión de todas las posibles alternativas ofrecidas en el mercado. Los avances de éste, han sido discutidos con el Área de Electro-Control, encargada de administrar los sistemas de comunicación de la planta, y finalmente, la solución que mejor se ajusta a los requerimientos deseados y las limitaciones impuestas, resulta ser una red de radio basada en la tecnología de radio sobre IP (RoIP). Entonces se procede al diseño de la solución.

El diseño propuesto consiste en una disposición de estaciones de radio UHF, intercomunicadas mediante red de datos. Para esto, se considera el uso de un grupo de cámaras de inspección situadas a lo largo del sistema de conducción, como puntos de montaje para las estaciones de radio y equipos de conversión RoIP. Se considera además, el uso de la red de fibra óptica, ya dispuesta para la conexión de instrumentación en el sistema de descarga de efluentes, como medio de intercomunicación entre las estaciones de radio. El diseño concebido cumple con requerimientos de privacidad en la comunicación, capacidad de autonomía ante cortes de electricidad y cobertura. Esto último, se apoya con pruebas realizadas en terreno y resultados obtenidos con modelos computacionales. Asimismo, el diseño satisface la meta de tener un costo de implementación menor al de un proyecto anterior presentado por una empresa externa, para solucionar este mismo problema.



## Dedicatoria

En muchas ocasiones, durante este largo proceso de estudios, recordé la última conversación que tuve con mi abuelo en la que me dijo: “Daniel termina tu carrera, hazlo por mí”. Creo que cada vez que recordaba esa conversación, surgía una fuerza, una motivación para continuar, por esa razón, esta memoria va dedicada a su memoria. Va dedicada a mi tata “nene”.

## Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres, que nunca me negaron su apoyo, y que, si bien tuvieron que esperar mucho tiempo, nunca pusieron mayores presiones sobre mí.

Agradezco a mi profesor guía don Aldo Bombardiere Rozas que aceptó ayudarme con mi tema de memoria, y tuvo que lidiar con mis atrasos, con mis solicitudes a las autoridades de la facultad, donde siempre conté con su apoyo. Además, que, dado que yo estaba trabajando en Concepción, siempre hubo una dificultad para comunicarse y trabajar en conjunto, pero gracias a su buena voluntad, igual se sacó a flote el barco. Agradecerle también por las conversaciones, que más allá del tema propio de la memoria, siempre estaban cargadas de enseñanzas que yo valoro muchísimo. Agradecer también a mi profesor co-guía Claudio Estévez, que cuando le planteé mi necesidad de un profesor co-guía, no dudó en aceptar.

Agradecer a Celulosa Arauco por aceptarme en su programa de memorias y por asignarme un tema que calzaba muy bien con mis intereses y mi formación, además de entregarme los medios necesarios para lograr mantenerme sin sobresaltos durante los 10 meses que estuve trabajando con ellos. En especial agradecer a don Anatolio Navarro y Mario Aldana, que eran los encargados de mi proceso de memoria, y los cuales siempre se mostraron dispuestos a ayudarme con los diversos problemas que hubo que enfrentar, muy comprensivos y buenas personas.

Quisiera agradecer al ambiente de Beauchef, que, aunque en algún momento me cansó y no quería ni aparecerme por esa facultad, ahora que ya ha pasado el tiempo, me doy cuenta de la gran suerte que tuve con poder estudiar ahí. Grandes personajes, grandes mentes, grandes ideas, eso es Beauchef, ahí forje mi forma de pensar, y estoy muy conforme con el resultado.

En última instancia agradecer a mi gran amigo Adolfo Henríquez, que cuando había perdido toda la fe en terminar esta memoria, me entregó todo su apoyo, ayudándome a discutir acerca del trabajo realizado y sirviéndome como gran motivación para retomar este proyecto. Agradezco también sus opiniones y críticas que hicieron de este trabajo algo mejor de lo que ya había hecho.

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1	MARCO NORMATIVO.....	4
2.1.1	<i>Gestión de Espectro Radioeléctrico</i> .....	4
2.1.2	<i>LEY GENERAL DE TELECOMUNICACIONES</i> .....	6
2.1.3	<i>MARCO TÉCNICO RELATIVO A LOS SERVICIOS LIMITADOS</i> .....	7
2.2	MECANISMOS DE PROPAGACIÓN PARA VHF Y UHF .....	8
2.2.1	<i>Espacio libre</i> .....	8
2.2.2	<i>Reflexión</i> .....	8
2.2.3	<i>Scattering</i> .....	9
2.2.4	<i>Refracción</i> .....	10
2.2.5	<i>Difracción</i> .....	11
2.2.5.1	<i>Elipsoide de Fresnel y modelo de borde de cuchillo</i> .....	12
2.2.6	<i>Absorción</i> .....	15
2.3	MODELOS DE PROPAGACIÓN .....	15
2.3.1	<i>Modelos punto-a-zona</i> .....	15
2.3.2	<i>Modelos punto a punto</i> .....	17
2.3.3	<i>Modelo de Longley-Rice</i> .....	17
2.3.3.1	<i>Parámetros del Método</i> .....	18
2.3.3.2	<i>Funcionamiento del Método</i> .....	19
2.4	ELEMENTOS DE UN RADIO ENLACE .....	24
2.4.1	<i>Potencia nominal</i> .....	25
2.4.2	<i>Conectores y Feeders</i> .....	26
2.4.3	<i>Unidades de sintonización, Amplificadores y Combinadores</i> .....	26
2.4.4	<i>Antenas Bases</i> .....	26

2.4.5	<i>Antena móvil</i> .....	27
2.4.6	<i>Sensibilidad del receptor</i> .....	27
2.5	CÁLCULO DE BALANCE DE PÉRDIDAS PARA EL ENLACE .....	28
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>30</b>
3.1	OBJETIVOS PRINCIPALES .....	30
3.2	OBJETIVOS SECUNDARIOS .....	30
<b>4</b>	<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>31</b>
4.1	SISTEMA DE CONDUCCIÓN Y DESCARGA DE EFLUENTES AL MAR .....	32
4.1.1	<i>Cámaras de sectorización</i> .....	37
4.1.2	<i>El personal de inspección del emisario</i> .....	39
4.1.3	<i>La Resolución Exenta N°51/2006</i> .....	39
4.1.4	<i>Historial de fallas del emisario</i> .....	42
4.1.5	<i>Proyecto de radiocomunicaciones para el emisario rechazado anteriormente</i> .....	43
4.2	RED DE RADIO EXISTENTE EN LA PLANTA.....	43
4.3	RED DE FIBRA ÓPTICA EN EL EMISARIO .....	44
<b>5</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>46</b>
5.1	REQUERIMIENTOS Y LIMITACIONES .....	48
<b>6</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>52</b>
7.1	PRUEBAS DE RADIO.....	52
7.2	ANÁLISIS DE DATOS Y VALIDACIÓN DE MODELO.....	54
7.3	COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS .....	62
7.3.1	<i>Motorola IP Site Connect</i> .....	63
7.3.2	<i>Kenwood NEXTEdge</i> .....	64
7.3.3	<i>Icom IDAS</i> .....	65
7.3.4	<i>Conversores RoIP</i> .....	66
7.3.5	<i>Selección de solución</i> .....	67
7.4	REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD Y RESPALDO ENERGÉTICO .....	70

7.5	ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN .....	73
7.6	ANÁLISIS DE COSTOS .....	76
7.7	PLAN DE IMPLEMENTACIÓN.....	79
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>83</b>
<b>1</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>A</b>
1.1	SOLUCIÓN BASADA EN RED CELULAR .....	A
1.1.1	<i>Prueba de cobertura celular .....</i>	<i>A</i>
1.1.2	<i>Soluciones disponibles en el mercado basadas en utilización de red celular.....</i>	<i>C</i>



# Índice de Tablas

TABLA 1 BANDAS DE FRECUENCIA DEFINIDAS POR LA UIT.. REF: (UIT-R, 2012 PÁG. 27).....	6
TABLA 2 EJEMPLO DE DENOMINACIÓN DE EMISIONES ITU.....	6
TABLA 3 LONGITUDES DE ONDAS PARA DISTINTAS FRECUENCIAS.....	8
TABLA 4 EJEMPLO DE CÁLCULO DE BALANCE DE PÉRDIDAS PARA UN ENLACE DE RADIO.....	28
TABLA 5 COMPARACIÓN EFLUENTE EMITIDO CON NORMAS AMBIENTALES.....	41
TABLA 6 CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN M3/S PARA ESTACIÓN PASO HONDO DEL RÍO ITATA.....	42
TABLA 7 DETALLE DE COSTOS.....	78

# Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1 EXTENSIÓN SISTEMA DE CONDUCCIÓN AL MAR	2
ILUSTRACIÓN 2 MAPA DE REGIONES ITU. REF: (UIT-R, 2012 PÁG. 37)	4
ILUSTRACIÓN 3 MUESTRA DEL PLAN DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN CHILE. UNIDAD DE PRIMERA COLUMNA: MEGA HERTZ. REF: (SUBTEL, 2005):	5
ILUSTRACIÓN 4 REFLEXIÓN DE UNA ONDA DE RADIO. ADAPTADO DESDE (GRAHAM, 2006 PÁG. 40)	9
ILUSTRACIÓN 5 SCATTERING EN UNA ONDA DE RADIO. ADAPTADO DE (BARCLAY, 2003 PÁG. 101)	10
ILUSTRACIÓN 6 FENÓMENO DE REFRACCIÓN	10
ILUSTRACIÓN 7 REFRACCIÓN ATMOSFÉRICA Y RADIO APARENTE DE LA TIERRA. BASADO EN (GRAHAM, 2006 PÁG. 44)	11
ILUSTRACIÓN 8 EFECTO DE DIFRACCIÓN	11
ILUSTRACIÓN 9 CONSTRUCCIÓN DEL ELIPSOIDE DE FRESNEL	12
ILUSTRACIÓN 10 TRANSMISIÓN EN LÍNEA DE VISTA Y ELIPSOIDE DE FRESNEL	13
ILUSTRACIÓN 11 MODELO DE BORDE DE CUCHILLO	13
ILUSTRACIÓN 12 FUNCIÓN DE PÉRDIDAS PUBLICACIÓN ITU-R P.526	14
ILUSTRACIÓN 13 ESTIMACIÓN MODELO PUNTO-A-ZONA PARA DISTINTOS EXPONENTES	16
ILUSTRACIÓN 14 REPRESENTACIÓN ALTURAS CONSIDERADAS EN $\Delta H$	18
ILUSTRACIÓN 15 ESQUEMA DE PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL MÉTODO DE 2 RAYOS	20
ILUSTRACIÓN 16 DIMENSIONES GEOMÉTRICAS UTILIZADAS EN EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN	22
ILUSTRACIÓN 17 ELEMENTOS TÍPICOS DE UN RADIO ENLACE Y NIVELES DE SEÑAL	25
ILUSTRACIÓN 18 DIAGRAMA POLAR DE UNA ANTENA DIRECTIVA	27
ILUSTRACIÓN 19 TRAZADO DEL SISTEMA DE DESCARGA AL MAR	31
ILUSTRACIÓN 20 VISTA INTERIOR DE UNA CÁMARA DE SECTORIZACIÓN	32
ILUSTRACIÓN 21 TRAZADO DE EMISARIO AL MAR (EN VERDE), CON CÁMARAS DE SECTORIZACIÓN (EN AMARILLO) Y PLATA NUEVA ALDEA (EN LILA).	33
ILUSTRACIÓN 22 VISTA SECCIÓN EMISARIO	34
ILUSTRACIÓN 23 PERFIL LONGITUDINAL EMISARIO	35

ILUSTRACIÓN 24 CRUCE RÍO ITATA	36
ILUSTRACIÓN 25 VISTA INTERIOR CÁMARA DE INSPECCIÓN VENTOSA	37
ILUSTRACIÓN 26 MONTAJE PRUEBA DE COBERTURA DE RADIO	52
ILUSTRACIÓN 27 RESULTADO PRUEBA DE COBERTURA DE RADIO	53
ILUSTRACIÓN 28 COMPARACIÓN RESULTADOS TEÓRICOS Y REALES C0.	56
ILUSTRACIÓN 29 DIAGRAMA DE NIVELES DE COBERTURA C0	57
ILUSTRACIÓN 30 NIVELES DE SEÑAL C1	57
ILUSTRACIÓN 31 PREDICCIÓN C2	58
ILUSTRACIÓN 32 PREDICCIÓN C4	58
ILUSTRACIÓN 33 PREDICCIÓN C7	59
ILUSTRACIÓN 34 ERROR EN PREDICCIÓN C7 Y CCM	59
ILUSTRACIÓN 35 PREDICCIÓN COBERTURA TOTAL	60
ILUSTRACIÓN 36 COBERTURA C0-C1-C2	61
ILUSTRACIÓN 37 COBERTURA C2-C3-C4	61
ILUSTRACIÓN 38 COBERTURA C7-C5	62
ILUSTRACIÓN 39 COMPARACIÓN DESEMPEÑO DIGITAL-ANÁLOGO	64
ILUSTRACIÓN 40 SISTEMA MULTI-SITIO CONVENCIONAL DE KENWOOD NEXTEEDGE CON VOTING	65
ILUSTRACIÓN 41 REPETIDORAS ICOM CONECTADAS MEDIANTE RED IP	66
ILUSTRACIÓN 42 PUENTE IP CON EQUIPO ICOM VE-PG3	66
ILUSTRACIÓN 43 SISTEMA VOTING	68
ILUSTRACIÓN 44 COMUNICACIÓN DE DOS MÓVILES EN LA MISMA ESTACION	69
ILUSTRACIÓN 45 SISTEMA DE RESPALDO ENERGÉTICO	72
ILUSTRACIÓN 46 DIAGRAMA DE CONEXIONES SOLUCIÓN FINAL	73
ILUSTRACIÓN 47 INSTALACIÓN DE ANTENA	74
ILUSTRACIÓN 48 COBERTURA CONJUNTA ESTIMADA PARA DISEÑO DEFINITIVO	75
ILUSTRACIÓN 49 CARTA GANTT PARA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	80
ILUSTRACIÓN 50 PRUEBA DE COBERTURA CELULAR	B

ILUSTRACIÓN 51 MONTAJE AMPLIFICADOR DE SEÑAL CELULAR

D

ILUSTRACIÓN 52 ESQUEMA FUNCIONAMIENTO APLICACIÓN ZELLO

E

## Listado de Acrónimos

WIFI	Wireless Fidelity
RoIP	Radio Over IP
IP	Internet Protocol
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
HF	High Frequency
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
FM	Frequency Modulation
COREMA	Comisión Regional de Medio Ambiente
GPS	Global Positioning System
CFI	Complejo Forestal e Industrial
RIL	Residuo Industrial Líquido
ITM	Irregular Terrain Model

# 1 Introducción

Actualmente, la mayor parte de los procesos industriales requieren de la comunicación a distancia entre empleados, entre máquinas, o entre máquinas y empleados. Por lo tanto, estos procesos industriales demandan la implementación de sistemas de telecomunicación. Así como para comunicar un grupo de computadores se utilizan redes IP montadas sobre enlaces de fibra óptica, de cable Ethernet o sobre enlaces inalámbricos WIFI; para la comunicación entre equipos de instrumentación, se utilizan estos mismos medios físicos pero con protocolos especiales de comunicación; para la comunicación de personas se utiliza el teléfono fijo, teléfonos celulares, teléfonos IP, radios UHF o VHF, radios satelitales, etc.

Con el párrafo anterior, se busca mostrar que hay numerosas opciones disponibles para satisfacer distintas necesidades específicas de comunicación y la selección del sistema adecuado para cada caso se convierte en una materia de estudio que debe considerar factores ambientales, legales, económicos y técnicos. Esta materia de estudio es lo que se conoce como la ingeniería de sistemas de telecomunicación, que corresponde justamente con las labores realizadas en la presente memoria. En esta memoria se diseña un sistema de comunicación, basándose en conceptos y metodologías de la ingeniería de sistemas de telecomunicación, para dar solución a un problema de conectividad, en el marco de un proceso industrial. Este proceso industrial es la producción de celulosa realizada por la planta Nueva Aldea, perteneciente a la empresa Celulosa Arauco y Constitución, ubicada en el kilómetro 21 de la ruta Itata en la VII región (36°39'28.4''S,72°28'34.8''W).

El problema de conectividad abordado, es la falta de canales adecuados de comunicación entre el personal en la planta y otro grupo de empleados que desempeñan sus trabajos fuera de este mismo complejo industrial. Este grupo de empleados, denominado *equipo de inspección*, ejecuta labores de mantención correctivas y preventivas a lo largo de un sistema de conducción de efluentes, cuya función es evacuar los residuos industriales líquidos hacia el mar. La extensión de este sistema de conducción se puede apreciar en la Ilustración 1.



*Ilustración 1 Extensión sistema de conducción al mar*

El sistema de conducción tiene una extensión de 54 km y el equipo de inspección se encuentra constantemente en movimiento a través de esta extensión realizando labores de mantenimiento programadas o respondiendo a instrucciones de contingencia emitidas desde la planta. Es crítico que las comunicaciones entre la planta y el equipo de inspección sean fluidas, pues un error en las comunicaciones pone en serio peligro el buen funcionamiento del sistema de descarga de efluentes. Actualmente, el método de comunicación utilizado es la telefonía celular, pero dada la complicada geografía del lugar y la poca densidad de antenas celulares, se presentan amplias zonas donde la planta y el equipo de inspección quedan totalmente incomunicados. Entonces se puede entender el propósito de este trabajo de memoria, que consiste en encontrar una alternativa que permita mejorar la calidad de las comunicaciones entre la planta y el equipo de inspección, lo que involucra, por lo tanto, el diseño de una red de comunicaciones móviles. Los criterios de selección de la alternativa adecuada, se discuten en el cuerpo de esta memoria, pero se puede adelantar que debe cumplir con entregar una zona de cobertura mínima, debe tener capacidad de respuesta ante cortes de luz, debe proveer una comunicación segura (que no cualquiera pueda escuchar o participar en las conversaciones) y debe ser económico, o al menos más económico que un proyecto antes presentado para resolver la misma problemática, que fue descartado debido a los altos costos que implicaba.

El trabajo realizado fue organizado en etapas. En principio, se revisa la literatura necesaria para enfrentar el problema desde la perspectiva de la ingeniería de sistemas de telecomunicaciones, lo que se incluye en la sección Marco Teórico. Tras eso se revisan los antecedentes que permiten

caracterizar el problema y definir los requerimientos y limitaciones del diseño a realizar. Luego se investigan las tecnologías y productos disponibles en el mercado, para entonces decidir a favor de una alternativa. Finalmente, la alternativa escogida es convertida en un proyecto de implementación con plazos de ejecución y costos estimados.



## 2 Marco teórico

### 2.1 Marco Normativo

#### 2.1.1 Gestión de Espectro Radioeléctrico

Las redes de comunicación móvil no funcionan en forma aislada, éstas deben convivir en el llamado *espacio radioeléctrico* con muchos otros servicios, como lo son la radiodifusión televisiva, diversas redes de telefonía celular, comunicaciones satelitales, etc. Para coordinar el funcionamiento de estos distintos servicios, lo que se traduce en evitar episodios de interferencia entre uno y otro, es que existen organismos encargados de administrar los recursos radioeléctricos, esto es, entregar permisos de utilización de ciertos rangos de frecuencias para la propagación de ondas electromagnéticas de un cierto servicio.

A nivel mundial, el principal agente regulador es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, [www.itu.int](http://www.itu.int)), y luego existen organismos regionales, como es en el caso de Chile, la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL).

Desde el punto de vista de la atribución global del espectro de frecuencia, la UIT divide al mundo en tres Regiones, donde Chile pertenece a la Región 2, como se puede apreciar en la Ilustración 2:

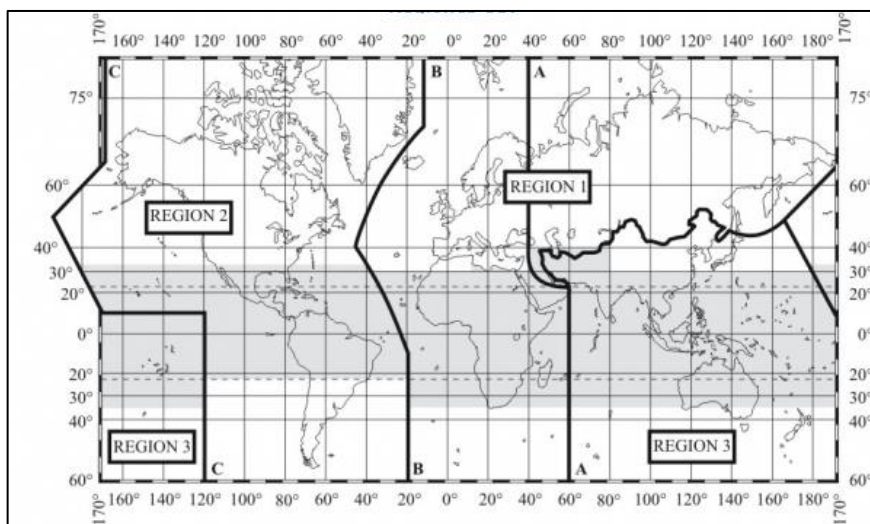


Ilustración 2 Mapa de regiones ITU. Ref: (UIT-R, 2012 pág. 37)

Esta división planteada por la UIT se define en el *Artículo 4* de su *reglamento De radiocomunicaciones* (2012) (UIT-R, 2012 pág. 33). Este artículo es incluido íntegramente por el organismo administrador en Chile, la SUBTEL, en su vigente *Plan General De Uso Del Espectro Radioeléctrico* (Decreto N°127, 1982), además se puede comprobar que la asignación del espacio radioeléctrico entre los diversos servicios, planteada en este último documento, es prácticamente la misma que la distribución recomendada por la UIT. En la Ilustración 3 se muestra la distribución del espectro radioeléctrico para Chile, entre las frecuencias de 430 y 806 MHz, a modo de ejemplo. Esta distribución es fielmente acorde con la distribución recomendada por la UIT para Región 2.

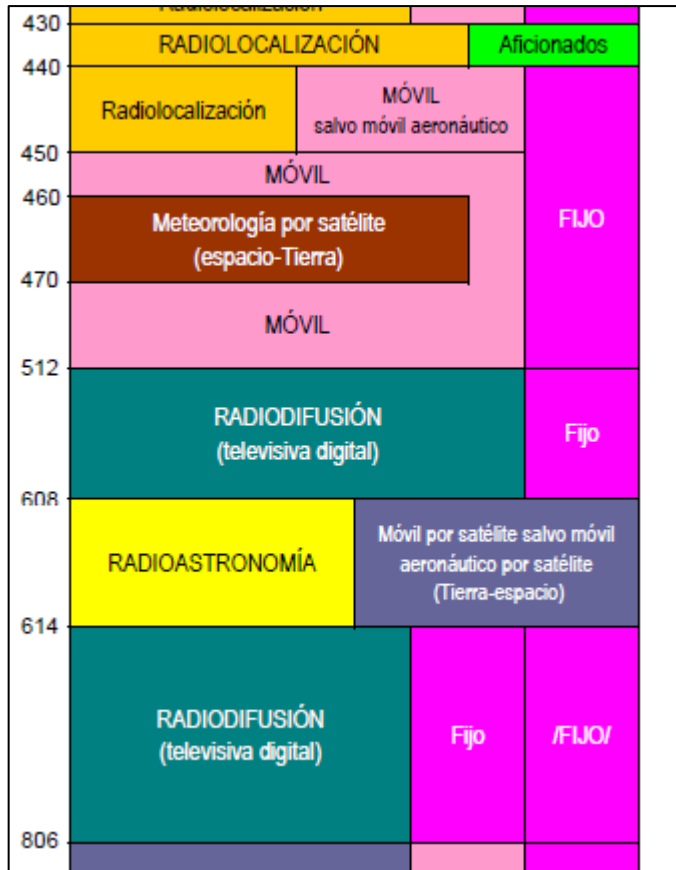


Ilustración 3 Muestra del plan de distribución de espectro radioeléctrico en Chile. Unidad de primera columna: Megahertz. Ref: (SUBTEL, 2005):

A continuación, se señalan otros aspectos importantes incluidos en las normas, donde al igual que los puntos anteriores tanto el plan general de uso del espectro radioeléctrico SUBTEL como el *Reglamento De Radiocomunicaciones UIT*, son plenamente concordantes. Por ejemplo, se define una nomenclatura para las sub bandas de frecuencia, que es el estándar utilizado en radiocomunicaciones, y se muestra en la Tabla 1.

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica	Abreviaturas para las bandas
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas	B. Mam
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas	B. km
6	MF	300 a 3000 kHz	Ondas hectométricas	B. hm
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas	B. dam.
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas	B. m
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas	B. dm
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas	B. mm
12	-	300 a 3000 GHz	Ondas decimilimétricas	

Tabla 1 Bandas de frecuencia definidas por la UIT. Ref: (UIT-R, 2012 pág. 27)

También se presenta una denominación para los tipos de emisiones, dependiendo del ancho de banda utilizada y la clase de la emisión. Ésta considera gran cantidad de casos, por lo que la explicación completa sería muy extensa; entonces, solo se muestra a continuación un ejemplo práctico:

- La denominación del tipo de emisiones utilizadas para comunicar radios de 2 vías (las utilizadas en la empresa donde se realiza el proyecto), es 11K0F3EJN. Esto significa:

Característica	Símbolo	Significado
Anchura de banda	11K0	11,0 kHz
Tipo de la modulación de la portadora principal	F	Modulación de frecuencia
Naturaleza de la señal que modula la portadora principal	3	Un solo canal con información analógica
Tipo de información que va a transmitir	E	Telefonía (incluida radiodifusión sonora)
Detalles de la señal	J	Sonido de calidad comercial
Naturaleza del multiplexaje	N	Ausencia de multiplexaje

Tabla 2 Ejemplo de denominación de emisiones UIT

### 2.1.2 LEY GENERAL DE TELECOMUNICACIONES

Dada las dimensiones del proyecto en el cual se trabaja, no es necesario seguir ahondando en lo que son las normas internacionales, pues al ser servicios locales quedan plenamente reguladas según la jurisprudencia chilena.

Las comunicaciones a través de radios bases y radios móviles de 2 vías, según la clasificación de servicios de telecomunicaciones incluida en el Artículo N°3 de la *Ley General De Telecomunicaciones*, entran en la categoría de *Servicios Limitados*. A continuación, se presenta el fragmento del artículo correspondiente (Ley N°18168 , 1982):

“c) Servicios limitados de telecomunicaciones, cuyo objeto es satisfacer necesidades específicas de telecomunicaciones de determinadas empresas, entidades o personas previamente convenidas con éstas. Estos servicios pueden comprender los mismos tipos de emisiones mencionadas en la letra a) de este artículo y su prestación no podrá dar acceso a tráfico desde o hacia los usuarios de las redes públicas de telecomunicaciones.

\*Los tipos de emisiones mencionadas en la letra a) del artículo son: emisiones sonoras, de televisión o de otro género”

En esta *Ley General De Telecomunicaciones* también se puede encontrar otros artículos referidos a estos *Servicios Limitados*. El Artículo 4°, señala que la operación de estos servicios estará sujeta a una regulación particular, la cual, más adelante en este capítulo es expuesta. El Artículo 9°, plantea que estos servicios, requieren de un permiso otorgado por resolución exenta de la SUBTEL, para su instalación operación y explotación. Estos permisos tienen una duración de 10 años, renovables, y la solicitud de renovación debe presentarse al menos 180 días antes del fin del período respectivo.

Las infracciones y multas son tratadas en el Artículo 36°, donde se plantean 4 tipos de sanciones: amonestación, multa, no inferior a 5 y no mayor a 1000 UTM, suspensión de trasmisiones (en forma temporal) o caducidad de la concesión. Todas estas medidas podrían ser tomadas en caso de infringir las normas de la presente ley, reglamentos, planes técnicos fundamentales (como el *Plan De Uso De Espacio Radioeléctrico*) o normas técnicas (como el *Marco Técnico Relativo A Los Servicios Limitados*, que se revisará a continuación).

### 2.1.3 MARCO TÉCNICO RELATIVO A LOS SERVICIOS LIMITADOS

Este marco técnico (Res. Ex. N°391, 1985) está orientado a dar las bases técnicas para el diseño de sistemas de comunicación, que cumplan con la definición de *Servicios Limitados*, y que utilicen las bandas HF, VHF o UHF. Además, está el *Instructivo Relativo A Los Servicios Limitados* (Res. Ex. N°352, 1985) que indica la forma de operar para conseguir un permiso de la SUBTEL para ejecutar proyectos de servicios limitados. Estos documentos, es decir, estas resoluciones exentas publicadas por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, además de sus posteriores modificaciones pueden encontrarse en la página:

<http://www.subtel.cl/lt/sl/>

## 2.2 Mecanismos de propagación para VHF y UHF

Los mecanismos de propagación son los fenómenos físicos que permiten la propagación de una onda de radio en el espacio. Para frecuencias en los rangos UHF y VHF, las longitudes de onda son pequeñas en comparación con la mayoría de los accidentes del terreno o edificaciones, y por lo tanto, estas estructuras tienen un efecto considerable en la propagación de energía. La Tabla 3 se muestran los valores de longitud de onda para distintas frecuencias. La propagación de ondas en las bandas VHF y UHF está dominada por los efectos de atenuación debido a la distancia, la reflexión, scattering, refracción atmosférica y difracción. Así mismo, otros factores ambientales, como las precipitaciones tienen un efecto despreciable (Graham, 2006 pág. 39).

Frecuencia (MHz)	Longitud de Onda (m)
3	100.00
30	10.00
100	3.00
300	1.00
500	0.60
800	0.38

Tabla 3 Longitudes de ondas para distintas frecuencias

### 2.2.1 Espacio libre

Cualquier onda radiada decae en potencia con la distancia a la fuente emisora. Para estimar estas pérdidas existe una fórmula de referencia fundamental, la ecuación de pérdidas en espacio libre para una antena isotrópica (Graham, 2006 pág. 40):

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d$$

Donde:

$L_{bf}$ : pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)

$d$ : distancia a la fuente (km)

$f$ : frecuencia (MHz)

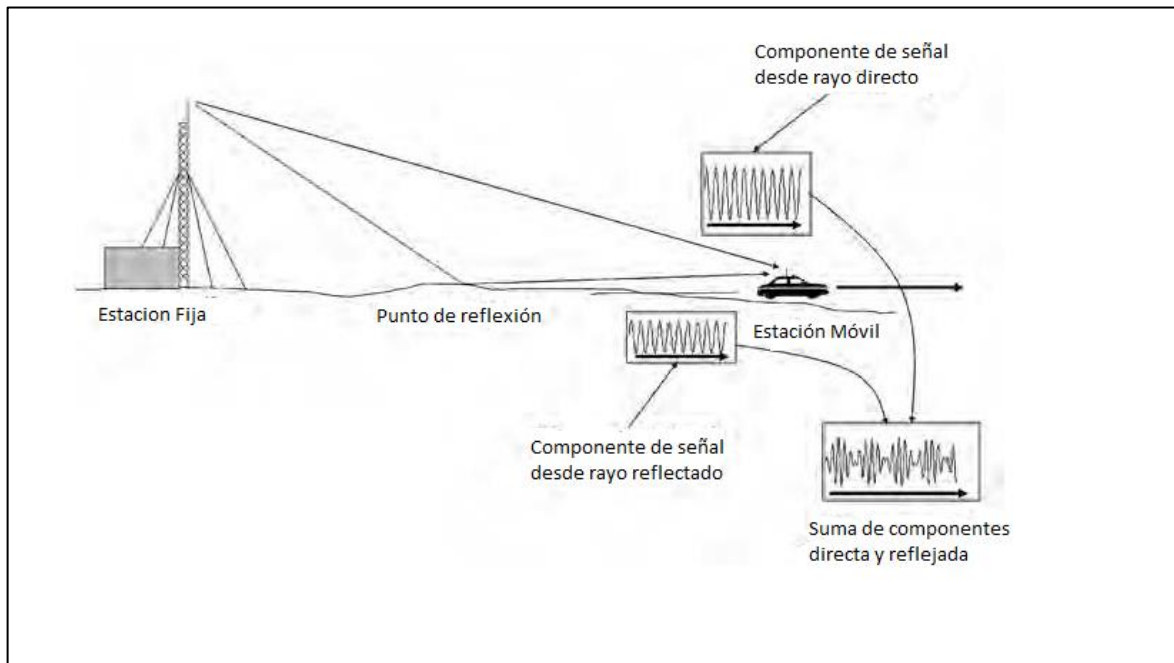
Esta fórmula fundamental puede ser utilizada como referencia, pero en la mayoría de los casos es necesario considerar factores adicionales. Estos factores corresponden a la consideración de los fenómenos de propagación que se explican a continuación.

### 2.2.2 Reflexión

Se produce cuando una onda de radio se encuentra con obstáculos de superficie plana. El efecto producido se traduce en la desviación de la dirección de la onda al reflejarse en la superficie, produciéndose además un cambio de fase y pérdida de potencia en la onda reflejada.

Es importante considerar que, en la práctica, el fenómeno de reflexión de una onda de radio sucede constantemente y en múltiples oportunidades, debido a los múltiples obstáculos que ésta encuentra

mientras se propaga. Esto último produce que a cada instante lleguen al receptor innumerables ondas provenientes de distintas trayectorias con distintas fases, y distintas magnitudes que se suman para determinar, en definitiva, la onda recibida. En la Ilustración 4 se puede apreciar lo antes descrito.



*Ilustración 4 Reflexión de una onda de radio. Adaptado desde (Graham, 2006 pág. 40)*

El aporte de cada componente en esta sumatoria de ondas que llega al receptor depende de la posición de este último, dando la posibilidad que las distintas ondas interfieran en forma constructiva o destructiva. Esto último puede ser estimado a partir de modelos matemáticos, e integrados a los modelos de propagación, que revisaremos más adelante. Pero la forma más usual de considerar los efectos de la reflexión es simplificando el problema, a solo un número limitado de trayectorias, que serían las más influyentes o representativas.

### 2.2.3 Scattering

Sucede cuando una onda de radio se encuentra con un obstáculo rugoso, en donde la reflexión es no especular, es decir, los reflejos no van una misma dirección o en una dirección predominante (Graham, 2006 pág. 42). Así, el fenómeno de scattering presenta muchas dificultades para ser modelado, debido a la gran cantidad y diversas formas de reflexión que lo componen. Lo cual se muestra en la Ilustración 5 .

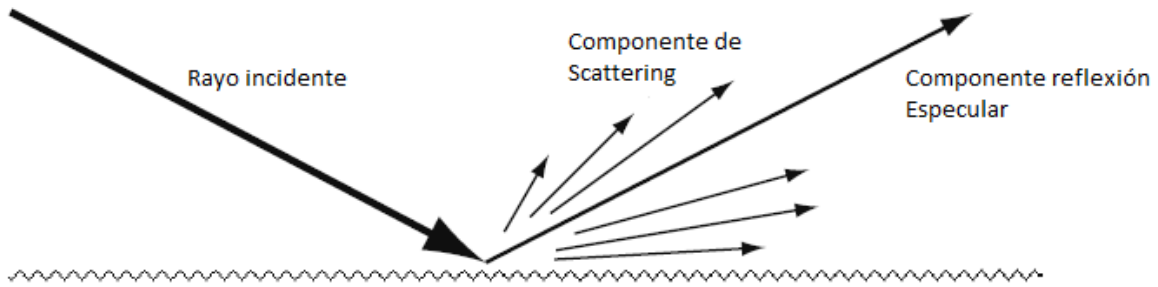


Ilustración 5 Scattering en una onda de radio. Adaptado de (Barclay, 2003 pág. 101)

Un caso particular es el scattering atmosférico, debido a la interacción entre los frentes de ondas y las partículas suspendidas en la atmósfera. El efecto de scattering puede llegar a ser el mecanismo de propagación más relevante para comunicaciones sin línea de vista, cuando la distancia y las obstrucciones son tales que la propagación mediante difracción es muy débil (Rice, y otros, 1965 pág. IV.1). Así mismo, es difícil aislar el efecto de scattering de los demás efectos de propagación, por lo que en general las estimaciones se basan en estadísticas generales, basadas en mediciones empíricas. (UIT-R P.1812-4, 2015).

Las señales transmitidas a través de scattering, sufren de variaciones rápidas y lentas. Las variaciones lentas, tienen que ver con cambios ambientales generales, como los cambios atmosféricos estacionales y diurnos. Las variaciones rápidas suceden por movimientos y cambios de irregularidades a baja escala. (UIT-R P.617-1, 1992)

#### 2.2.4 Refracción

Es el cambio de dirección del frente de onda propagado debido a diferencias de índice de refracción entre los medios de propagación. Este frente de onda —al pasar desde un medio de mayor a uno de menos índice de refracción— cambia su dirección según la *Ley de Snell*, como se muestra en la Ilustración 6:

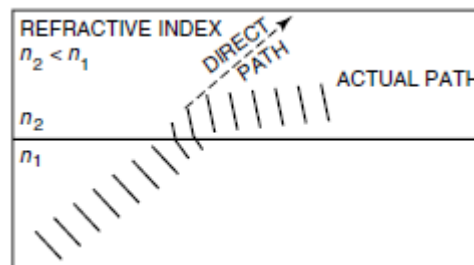


Ilustración 6 Ley de Snell

La principal consecuencia de este fenómeno sucede en la atmósfera, donde -debido a la existencia de diversas capas con distintas densidades, y por lo tanto, distintos índices de refracción- los frentes de ondas van cambiando continuamente su dirección, determinando una curvatura en su trayectoria. Esto produce que bajo ciertas condiciones las radiaciones puedan alcanzar puntos de recepción más allá del horizonte visual, como se muestra la Ilustración 7:

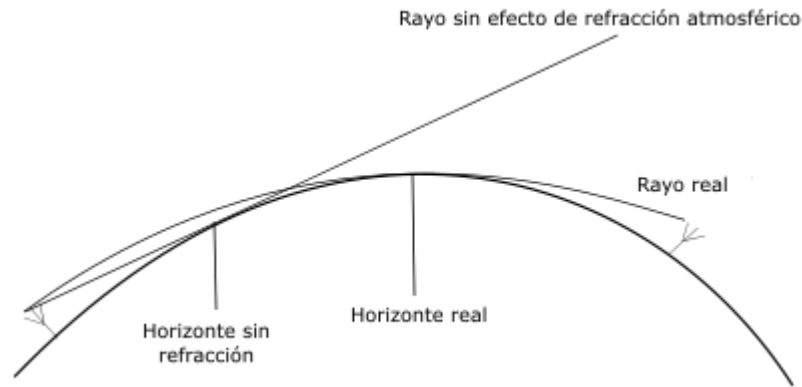


Ilustración 7 Refracción atmosférica y radio aparente de la tierra. Basado en (Graham, 2006 pág. 44)

Para considerar este efecto se define un factor  $k$ , que pondera el radio real de la tierra y determina así un radio terrestre aparente, con un horizonte visual que coincide con el horizonte de radio (real). El valor típico del factor  $k$  es  $4/3$ . Existen casos muy específicos en donde el radio aparente es tan alto, que la tierra pareciera plana, en el fenómeno denominado ducto radioeléctrico, o cuando la onda se curva hacia la tierra antes de alcanzar el horizonte óptico, conocido como súper difracción.

Además del factor  $k$ , los distintos modelos de propagación utilizan diversas variables para considerar el fenómeno de refracción. En general, tiene que ver con factores de corrección que modifiquen las dimensiones involucradas, tomando en cuenta el efecto de curvatura que se produce.

### 2.2.5 Difracción

Se produce cuando un frente de onda rodea los bordes de un obstáculo. Puede ser de utilidad en casos donde no existe línea de vista, en donde el efecto de difracción puede ser utilizado para poder sobrepasar accidentes geográficos y edificaciones, como se muestra en la Ilustración 8.

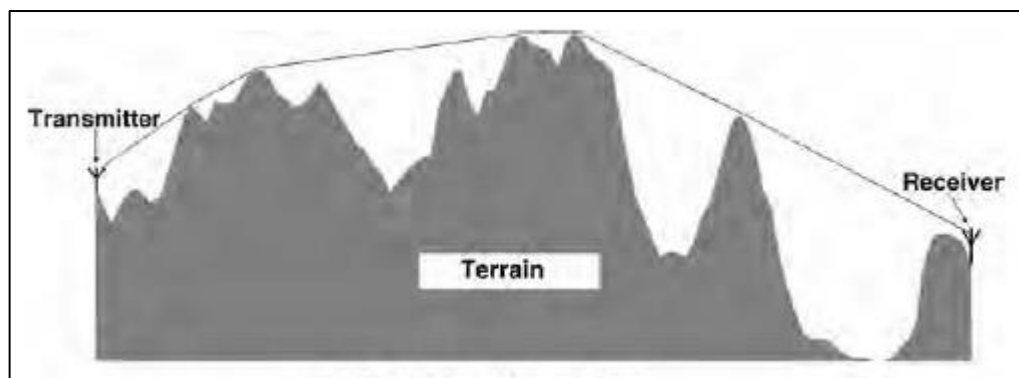


Ilustración 8 Efecto de difracción

Las pérdidas en nivel de señal son mucho mayores en comparación con la propagación en espacio libre, y por lo tanto el rango de alcance mucho menor. Pero en ciertas circunstancias, este método



de propagación se convierte en una buena opción. El modelamiento básico para este fenómeno se denomina modelo *knife-edge* (borde de cuchillo), que se revisa más adelante. Otra serie de modelos más complejos pueden encontrarse en la publicación UIT-P.625.

### 2.2.5.1 Elipsoide de Fresnel y modelo de borde de cuchillo

Elipsoide de Fresnel, es un elipsoide con focos en A y B, siendo A y B las posiciones del emisor y el receptor, y en la que cada punto M cumple con la igualdad:

$$AM + MB = AB + n \frac{\lambda}{2}$$

AM y MB son distancias entre un punto M del elipsoide y los focos A y B (emisor y receptor), AB es la distancia entre los focos,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal, y  $n$  es un número entero mayor o igual que 1, llamado grado del elipsoide. La lógica detrás de esta fórmula es que, si en el punto M hay un obstáculo, entonces la onda reflejada por este obstáculo que llega al punto B, llega en fase con la onda original. Las dimensiones antes descritas pueden visualizarse en la Ilustración 9.

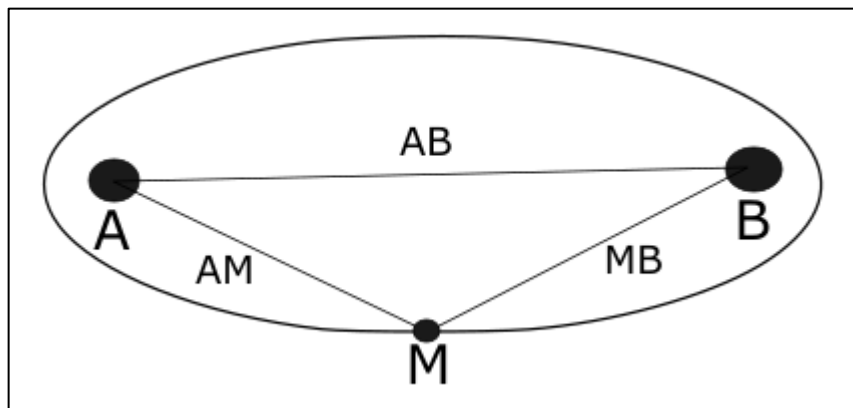


Ilustración 9 Construcción del elipsoide de Fresnel

Para cada valor de  $n$  se genera un elipsoide de grado  $n$  y por lo tanto utilizando un conjunto de valores  $n$  se tiene una familia de elipsoides con distintos radios  $R_n$ . elipsoide  $R_n$ , en un punto P entre A y B se puede calcular según la siguiente fórmula:

$$R_n = 550 \left[ \frac{n d_1 d_2}{(d_1 + d_2) f} \right]^{1/2}$$

Donde  $d_1$  y  $d_2$  corresponden a las distancias AP y PB respectivamente.

En términos prácticos, se dice que la propagación de una onda sucede en *línea de vista* si no existen obstrucciones al interior del elipsoide grado 1. En tal caso la propagación se realiza en condiciones similares a las de espacio libre. Como se muestra en la Ilustración 10.



Ilustración 10 Transmisión en línea de vista y elipsoide de Fresnel

Ahora, si hay un obstáculo al interior del elipsoide grado 1, la idea básica de los modelos punto-a-punto, es determinar qué tan inmerso está este obstáculo en el elipsoide de Fresnel, y entonces calcular un estimador de las pérdidas asociadas a ese obstáculo.

Para estimar los efectos asociados a estos obstáculos el modelo más ampliamente utilizado es el de *borde de cuchillo (knife-edge)*. Cuya formulación es presentada en la publicación UIT-R p.625.

La idealización realizada en este modelo es que se considera obstáculos infinitamente delgados. Las variables consideradas se muestran en la Ilustración 11.

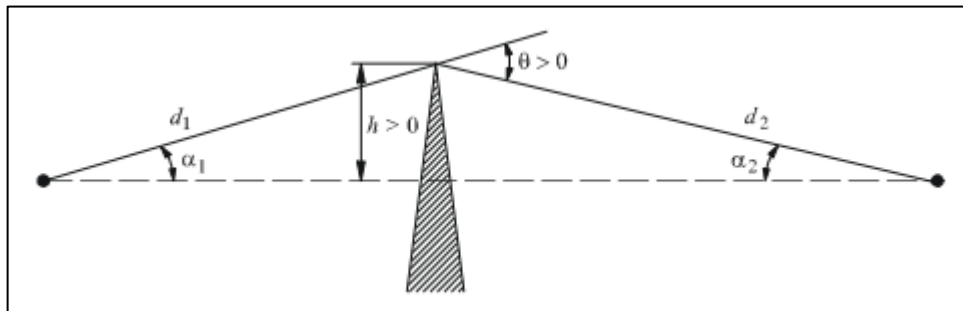


Ilustración 11 Modelo de borde de cuchillo

Donde:

$h$ : altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea,  $h$  es negativa

$d_1, d_2$ : distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo.

$d$ : longitud del trayecto.

$\theta$ : ángulo de difracción (rad); tiene el mismo signo que  $h$ . Se supone que el ángulo  $\theta$  es inferior a unos 0,2 rad, o sea, aproximadamente  $12^\circ$ .

$\alpha_1, \alpha_2$ : ángulos bajo los que, a partir de un extremo, se ven la cima del obstáculo y el extremo opuesto; tienen el mismo signo que  $h$  en las ecuaciones anteriores.

A partir de estas dimensiones se define un coeficiente de difracción  $v$  (Fresnel-Kirchhoff), que puede tener diversas formas equivalentes, según las variables geométricas que se quieran ocupar.

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}}$$

Luego, para estimar las pérdidas asociadas al obstáculo considerado, se requiere encontrar el valor de la función de pérdidas  $J(v)$  (en dB), que la UIT en su publicación P.526 entrega los valores con el siguiente gráfico.

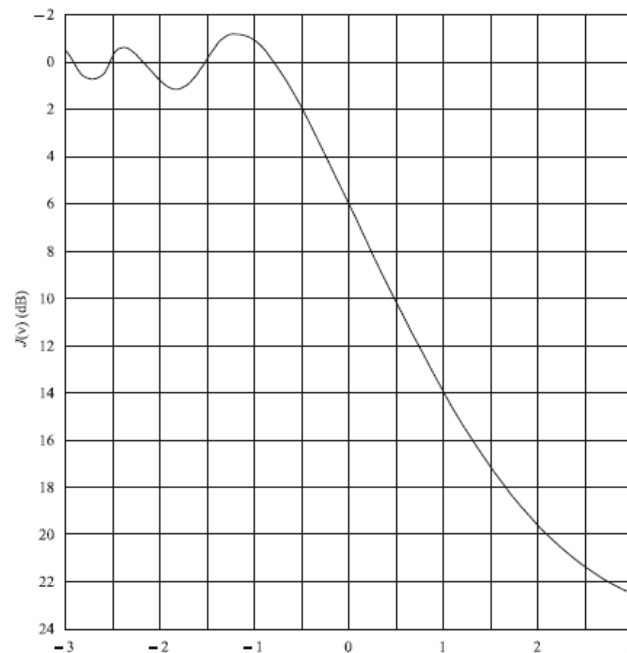


Ilustración 12 Función de pérdidas Publicación UIT-R P.526

En la práctica, las condiciones de propagación usualmente son mucho más complejas que la situación idealizada del modelo de borde de cuchillo, por lo tanto, se necesita de modelos que expandan esta teoría básica para tomar en cuenta la influencia de múltiples obstáculos y distintas formas.

### 2.2.6 Absorción

La energía irradiada también es absorbida por elementos del medio como edificios, vegetación, vehículos e incluso el propio cuerpo humano. Dado que las condiciones de absorción son muy variables -dependiendo del tipo de obstáculo, la posición y las dimensiones- la forma general de tomar en cuenta este efecto es a través de “*clúster*”, que son categorizaciones del tipo de elementos atenuantes en un terreno dado.

## 2.3 Modelos de propagación

Los modelos de propagación pretenden estimar las pérdidas sufridas por ondas de radio, debido a los efectos de propagación que suceden en el trayecto entre el emisor y receptor.

El modelamiento de la propagación es una parte muy importante en el proceso de diseño de una red de radio, esto debido a que la utilización de un buen método de modelamiento, permite evaluar el desempeño de una red antes de que sea construida. Así mismo decidir entre distintas tecnologías o arquitecturas sin tener que pasar por el proceso de prueba y error, que suele ser muy costoso en tiempo y en recursos.

En términos de estimación de la propagación en ondas de radio, existen dos tipos de modelos: los modelos punto-a-zona y los modelos punto-a-punto. Los modelos punto-a-punto se basan en el estudio de un enlace en particular, entre una estación base y un receptor en una ubicación establecida. Esto no quiere decir que no sean aplicables para comunicaciones móviles, pues es posible repetir el proceso para cada enlace particular y cada ubicación de un receptor móvil. El otro tipo de modelo es el punto-a-zona, el cual hace una descripción mucho menos precisa de las posibles trayectorias de la onda propagada, basándose sólo en un par de parámetros que deberían describir en forma general la propagación emitida por una estación base a una zona específica (no a un punto). Los modelos punto-a-punto necesitan mucho mayor nivel de información del entorno como, por ejemplo, el relieve.

### 2.3.1 Modelos punto-a-zona

Los modelos punto a zona son modelos estadísticos, basados en mediciones de nivel de señal realizados para cierto ambiente de propagación. Estos modelos son simples de utilizar y demuestran ser bastante precisos cuando el ambiente donde se utilizan corresponde con el ambiente donde se realizaron las mediciones que dieron origen al modelo. Por ejemplo, el modelo Okumura-Hata fue realizado a partir de mediciones en el sector urbano de la ciudad de Tokio (Graham, 2006 pág. 82), por lo tanto, para sectores urbanos de otras ciudades en el mundo, el modelo debería resultar apropiado.

La forma general de los modelos punto-a-zona es la siguiente:

$$E_r = -\gamma \log d + B(P_{BS}, f, h_{BS}, h_{MS})$$

Donde:

$E_r$  es la intensidad de campo recibida en dBμ/m

$d$  es la extensión del recorrido en km

$\gamma$  es el exponente inverso a la extensión del recorrido

$B$  es un factor basado en la potencia de la estación base  $P_{BS}$  (usualmente en dBW o dBm), frecuencia  $f$  (usualmente en MHz), altura de la antena base ( $h_{BS}$ ) y altura de la antena móvil ( $h_{MS}$ ), ambas usualmente representadas en metros por encima del suelo.

El modelo más básico es el denominado de exponente negativa, derivado directo de la ecuación de propagación en vacío:

$$L = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d$$

En donde, si se asume  $E_r = P_{BS} - L$ , se obtiene la siguiente forma:

$$E_r = P_{BS} - 20 \log d - 20 \log f - 32.44$$

Como se puede observar, esta ecuación concuerda con la forma general de un modelo punto-a-zona, donde  $-20 \log f$  es una función  $B$  dependiente sólo de la frecuencia y  $\gamma=20$ .

Cambiando este valor de  $\gamma$  se puede obtener un modelo aproximado para ciertas ecuaciones, por ejemplo  $\gamma=48$  es típico para ambientes urbanos y otros exponentes entre 25 y 30 representan mezclas de ambientes rurales y sub-urbanos. En la Ilustración 13, muestra la representación gráfica de la ecuación para distintos valores de  $\gamma$ .

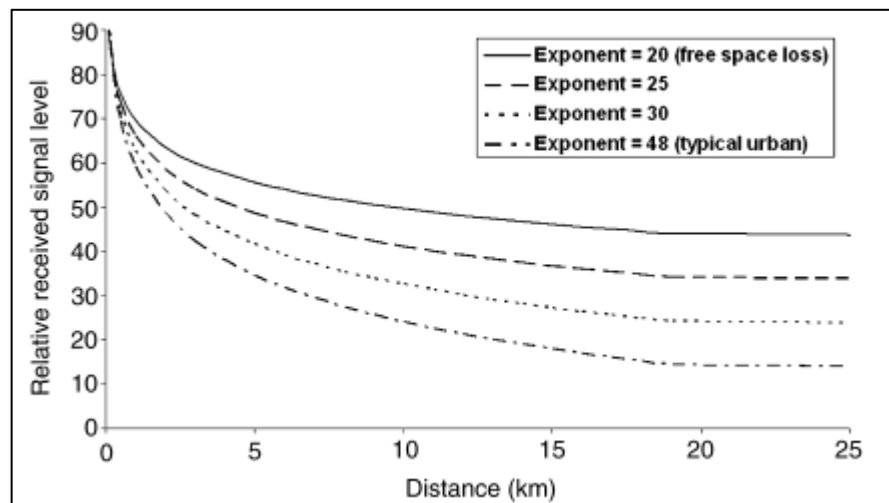


Ilustración 13 Estimación modelo punto-a-zona para distintos exponentes

Este modelo de la exponente inversa es el más simple y si bien es adecuado para tener una idea del radio de cobertura de una estación base, no es adecuado para una planificación más detallada. Sin embargo, esta forma puede ser modificada para considerar fluctuaciones típicas en el terreno y la altura de las antenas utilizadas.

Si bien los modelos punto-a-zona presentan en general una pobre correlación con resultados medidos, en comparación con modelos punto-a-punto bien calibrados, siguen siendo útiles para situaciones en donde no se cuenta con información detallada del entorno, o para etapas tempranas

en el proceso de planificación, cuando no se conoce muy bien las posibles ubicaciones de las estaciones base.

### 2.3.2 Modelos punto a punto

Los modelos punto a punto generalmente son más precisos que los modelos de punto-a-zona. Estos modelos tienen la desventaja de ser mucho más complejos y por lo tanto mucho más intensivos en uso de recursos para implementaciones en forma de software. Además, necesitan mayor información del terreno pues consideran los efectos físicos de la propagación y se calculan las pérdidas para cada par de puntos *emisor-receptor*. (Graham, 2006 pág. 49).

Los efectos principales considerados son el efecto de reflexión y difracción. Estos efectos igualmente son abordados a partir de simplificaciones, como las diversas variaciones del modelo de *borde de cuchillo*.

### 2.3.3 Modelo de Longley-Rice

A lo largo de este proyecto se pone especial énfasis en el estudio del modelo Longley-Rice (Longley, 1968), porque es el utilizado por el software Radio Mobile, con el que se realizaron todos los cálculos de radio enlaces para esta investigación. Por otro lado, el trabajo teórico realizado en esta memoria se inclina por este modelo debido a la gran cantidad de material que puede encontrarse, de forma gratuita, en la página de la National Technical Reports Library (NTRL), del U.S. Department of Commerce (<https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults.xhtml>). La calidad de estos materiales es inmejorable pues se trata justamente de las publicaciones originales que presentan este modelo y diversas mejoras posteriores.

El modelo de Longley-Rice, también conocido como Irregular Terrain Model (ITM), fue producido por el US Institute for Telecommunication Science (ITS) y desarrollado por A. G. Longley y P. L. Rice, siendo publicado en 1965 con el título “Transmission Loss Predictions for Tropospheric Circuits” (Rice, y otros, 1965). En esta publicación se explica todo el marco teórico del modelo, pero está especialmente enfocada en entregar un método para calcular pérdidas de transmisión (por eso que en el resto de este documento se utilizará más frecuentemente el término Método de Longley-Rice). En la misma línea, es que la publicación de 1968, “Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain, A Computer Method” (Longley, 1968), presenta entonces un método computacional, con el diagrama lógico de su implementación e incluso unas muestras de código realizados en lenguaje Fortrain IV.

El método de Longley-Rice permite predecir pérdidas de transmisión en un radio enlace, para un amplio rango de frecuencias, para diversos terrenos y regiones climáticas. La motivación para desarrollar este método es la dispersión extrema que existía entre mediciones empíricas y predicciones realizadas a partir del modelo de espacio vacío, donde aparecían diferencias significativas, de hasta 100 dB (Rice, y otros, 1965). Estas diferencias se atribuyen a la variedad de trayectos de propagación considerados, pero también se reconocen variaciones temporales para un mismo trayecto. Entonces este método pretende de alguna forma entregar predicciones más consistentes.

El método de Longley-Rice es del tipo punto-a-punto y considera la geometría del trayecto de propagación, la refracción atmosférica y las características de directividad de las antenas involucradas en la transmisión. El método ha sido testeado para el rango de frecuencias de 40 a 10.000 Hz. Está basado en la teoría de radio propagación para encontrar una media de pérdidas para un trayecto dado, pero considera mediciones empíricas para determinar variaciones regionales, estacionales y diurnas de esta media (Rice, y otros, 1965 pág. 1.1).

### 2.3.3.1 Parámetros del Método

Para describir las condiciones del fenómeno de propagación y realizar los cálculos pertinentes de pérdidas de transmisión, el modelo necesita de un conjunto de parámetros de entrada. Estos parámetros de entrada se dividen en 3 tipos:

#### 2.3.3.1.1 Parámetros del sistema

Este grupo de parámetros representa las características propias del sistema de radio, independiente del ambiente en que se produzca la propagación. Acá se encuentra la frecuencia de la onda transmitida, donde los límites de validez del modelo van desde 20 MHz a los 20 GHz. También se considera la distancia entre las antenas, siendo modelo válido para distancias de 1 Km a 2000 Km. Además, se consideran las características propias de las antenas involucradas, tomando en cuenta la altura de las antenas, la polarización de estas mismas y sus diagramas de radiación.

#### 2.3.3.1.2 Parámetros del ambiente

Estos parámetros son los que caracterizan el ambiente en el cual se propaga la onda. En cuanto al relieve el parámetro utilizado es  $\Delta h$ . Este parámetro es el rango interdecil de las alturas sobre y por debajo de una línea promedio obtenida por mínimos cuadrados del perfil topográfico sobre el que se propaga la onda, lo que se muestra en la Ilustración 14. El rango interdecil, es la diferencia entre las alturas que definen el primer y el noveno decil, dentro de la muestra estudiada. Además, se consideran las características eléctricas del suelo, conductividad y permitividad.

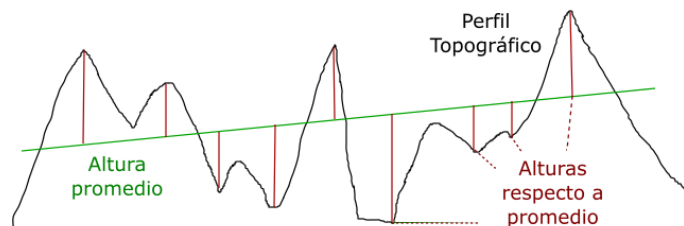


Ilustración 14 Representación alturas consideradas en  $\Delta h$

En cuanto a los efectos atmosféricos, se considera el gradiente de refractividad atmosférico, que es una medida de la diferencia en el coeficiente de refractividad entre capas atmosféricas, pero para el caso de este modelo la constante utilizada es la refractividad de la superficie. Esta constante permite modelar la curva que se genera en los frentes de onda al ir pasando por las diversas capas

atmosféricas, haciendo posible la simplificación de representar los rayos como líneas rectas, eso sí, cambiando el valor del radio de la Tierra por un radio efectivo  $a$ , que es función de la refractividad de la superficie.

Las condiciones atmosféricas, como la precipitación y la humedad, están consideradas en forma simplificada a través de 7 perfiles meteorológicos de referencia, generados a partir de una serie de mediciones realizadas en sitios con distintas características climáticas. Estos perfiles deben ser: ecuatorial, continental subtropical, marítimo subtropical, desierto, continental templado, marítimo templado sobre tierra, y marítimo templado sobre mar.

#### 2.3.3.1.3 Parámetros estadísticos

Estos parámetros permiten definir el nivel de confiabilidad de los resultados entregados por el modelo. Es una forma de estimar el error en la predicción debido a los cambios en los parámetros ingresados al modelo. Se utilizan curvas de ajuste que estiman la variación diurnas y estacionales de características atmosféricas para diversos climas. Pero como se indica en (Hufford, y otros, 1982 pág. 10), las variaciones temporales son muy poco relevantes para enlaces con distancias menores a 50 km, que es justamente el caso estudiado en este trabajo. Por lo tanto, no vale la pena entrar en mayores detalles respecto a estos parámetros.

#### 2.3.3.2 Funcionamiento del Método

A continuación, se describen a grandes rasgos los pasos que componen el método:

1. Se analiza el perfil topográfico del trayecto para el cuál se quiere estimar las pérdidas de propagación.
2. Se toma la distancia entre las antenas y se compara con la distancia desde la antena emisora hasta el primer obstáculo en la trayectoria, primer elemento dentro del elipsoide de Fresnel.
3. Si no hay obstáculos entre las 2 antenas, entonces asume que existe un enlace con línea de vista. Cuando un enlace tiene línea de vista, es decir, cuando las antenas transmisoras y receptoras se encuentran dentro del mismo horizonte, las pérdidas son estimadas según la teoría de 2 rayos (Longley, 1968 págs. 3.1 (Anexo 3-1)).
4. Si efectivamente existe un obstáculo entre las antenas se dice que el enlace tiene un horizonte común. En este caso se utiliza la teoría de difracción de borde-cuchillo de Fresnel-Kirchoff.
5. Cuando la distancia entre las bases es grande, las pérdidas por difracción pueden llegar a ser mayores pérdidas debido a scattering, entonces el método asume que el efecto predominante es el scattering.

A continuación, se revisan brevemente los algoritmos que el método establece para cada caso.

##### 2.3.3.2.1 Pérdidas con línea de vista

Cuando 2 antenas son visibles la una con la otra, se dice que existe línea de vista. Habiendo línea de vista entre las antenas, existe un caso que es el más simple, y es cuando el terreno sobre el que se propaga la onda de radio, presenta un relieve regular. En ese caso se considera una aproximación



esférica de la superficie, y se asume que el campo que llega a la antena receptora está conformado por 2 componentes, un rayo directo y un rayo reflejado sobre la superficie, el cual tiene igual ángulo incidente y reflejado ( $\psi$ ). Este ángulo se puede notar en la Ilustración 15.

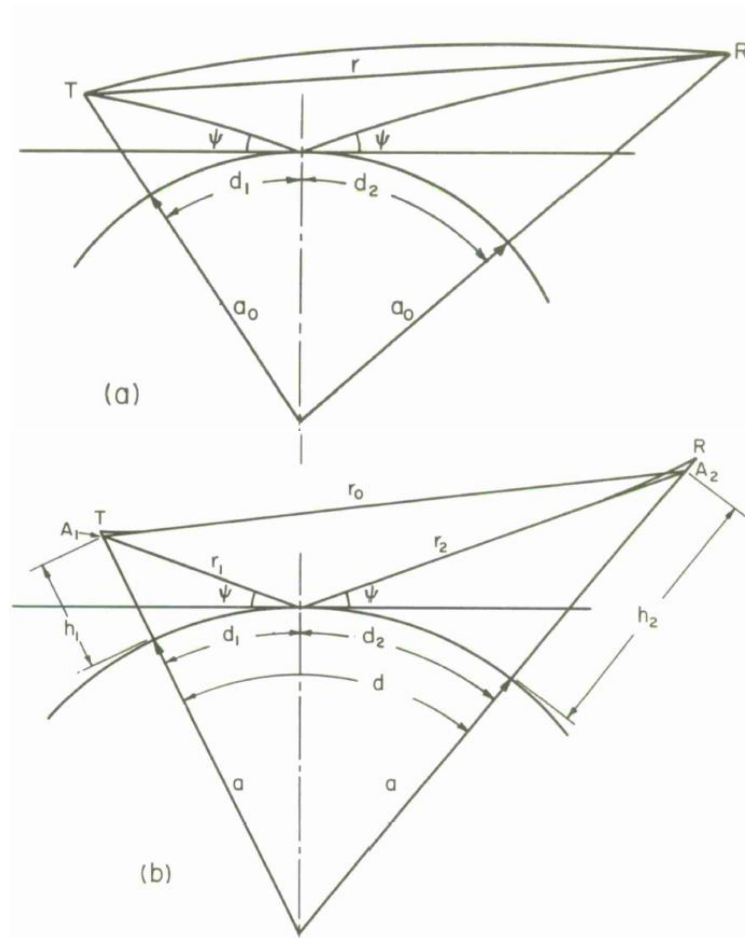


Ilustración 15 Esquema de parámetros involucrados en el método de 2 rayos

El campo que llega al receptor vía rayo directo, difiere del rayo reflejado en un ángulo de fase, el cual es una función de la diferencia entre las trayectorias. Además, es modificado debido al coeficiente de reflexión efectivo, y sufre un retardo de fase debido a la conductividad y la permeabilidad del suelo. El resultado está también sujeto a las ganancias que presenten las antenas involucradas para el rayo directo y el rayo reflejado.

El coeficiente de reflexión efectivo viene dado por:

$$R_e = DR \sqrt{\left(\frac{g_{r1}g_{r2}}{g_{o1}g_{o2}}\right)} \exp\left(\frac{-0.6\sigma_h \sin \psi}{\lambda}\right)$$

Donde  $g_{o1}$  y  $g_{o2}$ , representan las ganancias de cada antena, en dirección de la otra. Así como  $g_{r1}$  y  $g_{r2}$ , representan las ganancias de cada antena en la dirección del rayo reflejado.  $\sigma_h$  corresponde al factor de rugosidad del terreno.  $\Psi$  es el ángulo de reflexión.

$D$  que es el coeficiente de divergencia, viene dado por:

$$D = \left[ 1 + \frac{2d_1 d_2}{a \cdot d \cdot \tan \psi} \right]^{-1/2}$$

donde las variables geométricas son todas apreciables en Ilustración 15.

El término  $R$  corresponde a la magnitud del coeficiente de reflexión para una superficie, en función de su conductividad y su constante dieléctrica.

Luego, las pérdidas de trayectoria (en decibeles) vienen dadas por:

$$A - G_p = -10 \log \left\{ g_{o1} \cdot g_{o2} \left[ 1 + R_e^2 - 2R_e \cos \left( \frac{2\pi \Delta r}{\lambda} - c \right) \right] \right\} db$$

$\Delta r$  es la diferencia entre la longitud del trayecto directo y la longitud del trayecto reflejado, y se calcula con la siguiente relación.

$$\Delta r = \sqrt{d^2 + (h_1' + h_2')^2} - \sqrt{d^2 + (h_1' - h_2')^2} \cong 2h_1' h_2' / d$$

La aproximación señalada, es válida para ángulos de reflexión pequeños.

Las alturas  $h_1'$  y  $h_2'$ , son alturas efectivas que pretenden considerar las irregularidades del terreno. El método para el cálculo de estas alturas no será explicado, pero se debe señalar que corresponde a una aproximación basada en 20 mediciones de altura del relieve entre transmisión y receptor.

#### 2.3.3.2.2 Pérdidas Sin línea de vista con efecto de difracción predominante

Cuando el algoritmo reconoce la existencia de elementos dentro del elipsoide de Fresnel entonces comprueba que la comunicación no es en línea de vista, y asume que el mecanismo de propagación predominante es la difracción.

La estimación de las pérdidas por difracción se obtiene a partir de una suma ponderada entre los resultados obtenidos según el método de Vogler, para difracción sobre superficies lisas, y el método de doble borde de cuchillo.

$$A_d = (1 - w)A_r \quad dB$$

$A_d$  es la estimación de pérdidas total, mientras que  $A_k$  es la estimación obtenida por el método de doble borde de cuchillo y  $A_r$  la estimación obtenida por el método de Vogler, para superficies lisas. Luego el factor de ponderación  $w$ , se obtiene de forma empírica y es una función de las medidas geométricas mostradas en la Ilustración 16, y una medición de la "irregularidad" del terreno llamado  $\Delta h$ .  $\Delta h$  se obtiene a partir del rango interdecil que presenta un conjunto de 20 mediciones

de altura del terreno entre emisor y receptor. Entre mayor sea  $\Delta h$  más irregular es el terreno y más cercano a 0 es el valor del factor  $w$ .

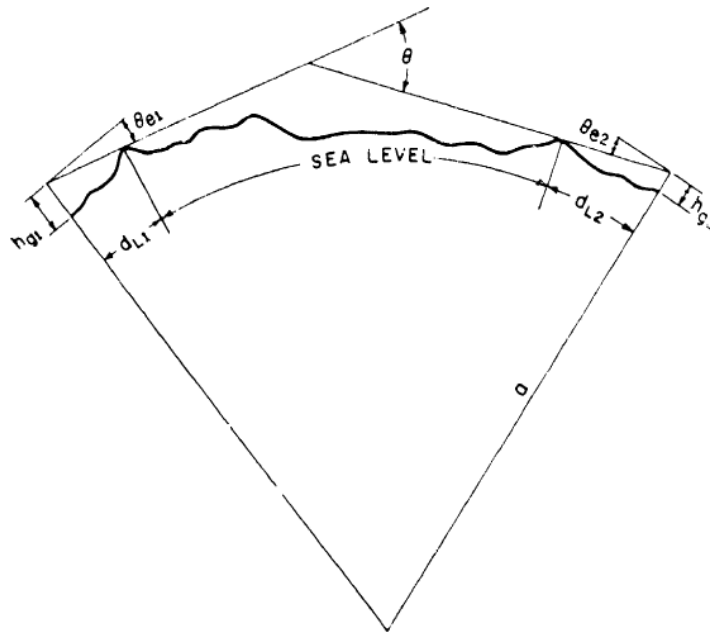


Ilustración 16 Dimensiones geométricas utilizadas en el cálculo de pérdidas por difracción

El método de Vogler consiste en la estimación de pérdidas por difracción, a partir de 4 factores:

$$A = G(d) - F(d_{L1}) - F(d_{L2}) + C_1(K, B^0)$$

El factor  $G$ , dependiente de la distancia, los factores  $F$  dependientes de las distancias  $d_{L1}$  y  $d_{L2}$  (cuyas definiciones pueden obtenerse de la Ilustración 16) y el factor  $C_1$  dependiente de las características electromagnéticas del terreno, la polarización de la onda y la frecuencia de la onda. Para información más detallada de este método consultar las siguientes fuentes (Rice, y otros, 1965), sección 8.1, y (Longley, 1968), Anexo 3-10.

El método de doble borde de cuchillo considera un factor denominado  $v1$  y  $v2$ :

$$v1 = 1.2915 \theta_e \sqrt{f d_{L1} (d - d_L) (d - d_{L2})}$$

$$v2 = 1.2915 \theta_e \sqrt{f d_{L2} (d - d_L) (d - d_{L1})}$$

Donde  $\theta_e$  corresponde a la suma de los ángulos de elevación,  $\theta_{e1}$  y  $\theta_{e2}$ , que pueden apreciarse en la Ilustración 16 y  $d_L$  corresponde a la suma de las distancias  $d_{L1}$  y  $d_{L2}$ , que también pueden verse en la Ilustración 16.

Entonces para cualquier valor de  $v1$  o  $v2$ , se estima una pérdida por difracción definida por:

$$\begin{cases} A(v) = 6.02 + 9.11v - 1.27v^2 & \text{para } 0 \leq v \leq 2.4 \\ A(v) = 12.953 + 20 \log_{10} v & \text{para } v > 2.4 \end{cases}$$

Luego para cualquier distancia, se estima la pérdida por difracción de doble borde de cuchillo como:

$$A_k(d) = A(v1(d)) + A(v2(d))$$

Finalmente, el algoritmo utiliza los métodos de Vogler y de doble cuchillo, para calcular las estimaciones para 2 distancias convenientes, y a partir de esas estimaciones se define una recta que representa la estimación de pérdidas por difracción total, en función de la distancia al emisor. Para mayor información acerca de este cálculo, consultar la fuente (Longley, 1968), Anexo 3.2.

### 2.3.3.2.3 Pérdidas Sin línea de vista con efecto de scattering predominante

Para realizar este cálculo se definen 2 distancias convenientes,  $d_5$  y  $d_6$ . Para esas distancias se obtienen las estimaciones de pérdida por scattering  $A_5$  y  $A_6$ , y entonces, al igual que para los cálculos de difracción, se define una recta que determina las estimaciones para cualquier distancia.

Las variables necesarias para obtener las estimaciones son las siguientes:

$$d_5 = d_L + 200 \text{ km}, \quad d_6 = d_L + 400 \text{ km}$$

$$\theta_5 = \theta_e + d_5/a, \quad \theta_6 = \theta_e + d_6/a \text{ radianes}$$

$$\begin{cases} H_{5,6} = \left( \frac{1}{h_{e1}} + \frac{1}{h_{e2}} \right) / (\theta_{5,6} f |0.007 - 0.058 \theta_{5,6}|) \text{ dB} \\ 0 \text{ 15 dB, el valor que sea menor} \end{cases}$$

$$S_5 = H_5 + 10 \log_{10}(f \cdot \theta_5^4) - 0.1(N_s - 301) \exp\left(-\frac{\theta_5 d_5}{40}\right) \text{ dB}$$

$$S_6 = H_6 + 10 \log_{10}(f \cdot \theta_6^4) - 0.1(N_s - 301) \exp\left(-\frac{\theta_6 d_6}{40}\right) \text{ dB}$$

En la sección anterior se explica lo que es  $d_L$  y  $\theta_e$ , la geometría es la misma. Mientras que  $h_{e1}$  y  $h_{e2}$ , son las alturas efectivas de las antenas, que son una adaptación de las alturas reales, tomando en cuenta la irregularidad del terreno.

Luego se substituyen estos valores en la expresión:

$$\widehat{A}_S = S + 97.1 + 0.212 \cdot \theta \cdot d - 2.5 \log_{10}(\theta \cdot d)$$

Así se obtienen la estimación  $A_5$ , evaluando en la expresión anterior  $S_5$ ,  $\theta_5$  y  $d_5$ . Análogamente se obtiene la estimación  $A_6$ . Realizados los cálculos anteriores, se obtiene la atenuación por scattering  $A_S$ :

$$A_S = A_{es} + m_s \cdot d \quad dB,$$

Donde:

$$A_{es} = A_5 - m_s d_5 \quad y \quad m_s = (A_6 - A_5)/(d_6 - d_5)$$

Además, el algoritmo necesita calcular la distancia  $d_x$ , que marca el punto donde la atenuación por scattering comienza a ser menor a la atenuación por difracción.

$$d_x = (A_{es} - A_{ed})/(m_d - m_s) \quad Km$$

Donde  $A_{ed}$  y  $m_d$ . Son los puntos de cruce y la pendiente de la recta que defina las estimaciones de pérdida por difracción.

## 2.4 Elementos de un radio enlace

Generalmente un radio enlace cuenta con los elementos mostrados en la Ilustración 17, aunque unidades de sintonización y combinadores son sólo usados en situaciones específicas que son explicadas más adelante.

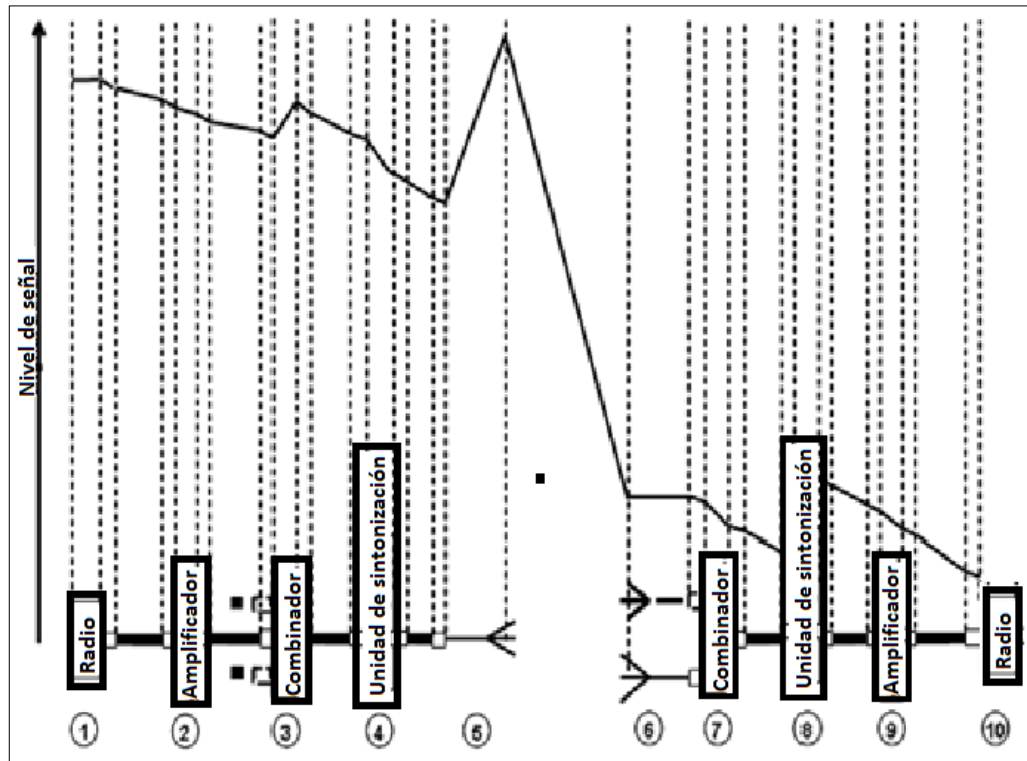


Ilustración 17 Elementos típicos de un radio enlace y niveles de señal

La conexión entre las unidades, desde la salida del equipo de radio (1), se realiza a través de feeders y conectores los que además añaden una pequeña componente de pérdidas. En la Ilustración 17 se puede notar como el nivel de señal aumenta o disminuye en cada etapa del proceso de emisión y recepción. Se puede observar el decaimiento asociado a pérdidas debido a la presencia de feeders y conectores, y las pérdidas en la trayectoria de propagación (entre 5 y 6). A su vez, se puede observar las ganancias producidas por la utilización de amplificadores (2), o las ganancias propias de las antenas emisoras o receptoras (5 y 6).

Entonces los cálculos que deben realizarse para estimar la factibilidad de concretar un enlace de radio se divide en dos partes, estimar las pérdidas entre equipos de radios y antenas, y a la vez determinar cuáles son los niveles mínimos de señal requeridos por los equipos de radio. A continuación, se revisan algunos conceptos necesarios para entender cómo funciona un radio enlace de radio y también se explican las funciones de cada elemento.

#### 2.4.1 Potencia nominal

La potencia nominal es el valor de potencia de salida del equipo de radio y generalmente viene en unidades de Watt, dBW (decibel Watt), o dBm (decibel mili Watt). De estas unidades la más utilizadas son las en decibeles dado que los otros componentes y equipos en general vienen descritos con valores en esta misma unidad. Las conversiones entre las distintas unidades son las siguientes:

$$Potencia(dBW) = 10 \log_{10}(Potencia(Watts))$$

$$Potencia (dBm) = Potencia(dBW) + 30$$

#### 2.4.2 Conectores y Feeders

Los feeders son cables eléctricos que conectan la salida del equipo de radio a la antena o a otros equipos. Los conectores son instalados en cada extremo del feeder para permitir la conexión. Los feeders y conectores provocan pérdidas, dependiendo del largo del feeder y del número de conectores. Generalmente estas pérdidas son bajas, pero si llegan a ser considerables es común el uso de amplificadores para contrarrestarlas.

#### 2.4.3 Unidades de sintonización, Amplificadores y Combinadores

Si se necesita un sistema de radio que cubra un gran rango de frecuencias es posible que para ciertas frecuencias las ganancias de la antena se vean muy disminuidas, esto debido a que las antenas son diseñadas, y su desempeño es óptimo, sólo para rangos de frecuencias acotados. En estos casos se utilizan unidades de sintonización que permiten ajustar la impedancia del sistema y mantener la ganancia constante para el rango de frecuencias a utilizar.

Otras veces es necesaria la utilización de amplificadores que aumentan el nivel de la señal de salida del equipo de radio y permiten alimentar la antena con mayores niveles de potencia. En el caso de uso de amplificadores, es muy importante considerar la ganancia agregada en los cálculos de cobertura y de balance de potencia del enlace.

Los combinadores, por su parte, son equipos utilizados para transmitir diversas señales a través de una misma antena. En el receptor se sirven para montar arreglos de antenas de diversidad. Estos equipos añaden pérdidas en todos los circuitos que se utilicen.

#### 2.4.4 Antenas Bases

Las antenas son las encargadas de transformar la energía eléctrica en potencia radiada, lo que se logra al desplazar las cargas eléctricas a través de la antena a frecuencias de radio. La teoría detrás de este fenómeno es relativamente compleja y no viene al caso ir más allá en su estudio, para el presente trabajo.

Existen diversos tipos de antenas, adaptadas para distintas aplicaciones y frecuencias. Para el caso de la banda VHF/UHF los desempeños de las antenas son expresados generalmente en términos de ganancia en comparación de la ganancia de una antena de referencia, la que suele ser la antena isotrópica, es decir una antena ideal que propaga hacia todas las direcciones la misma potencia. La unidad de este valor es el dBi.

La antena isotrópica es solo un concepto ideal, la construcción de esta no es posible. Por lo tanto, todas las antenas reales, tienen una cierta direccionalidad, es decir, radian en ciertas direcciones

con mayor intensidad que en otras. En general esta característica se representa a través de gráficas polares, en 2 planos, horizontal y vertical, como la que se muestra en la Ilustración 18.

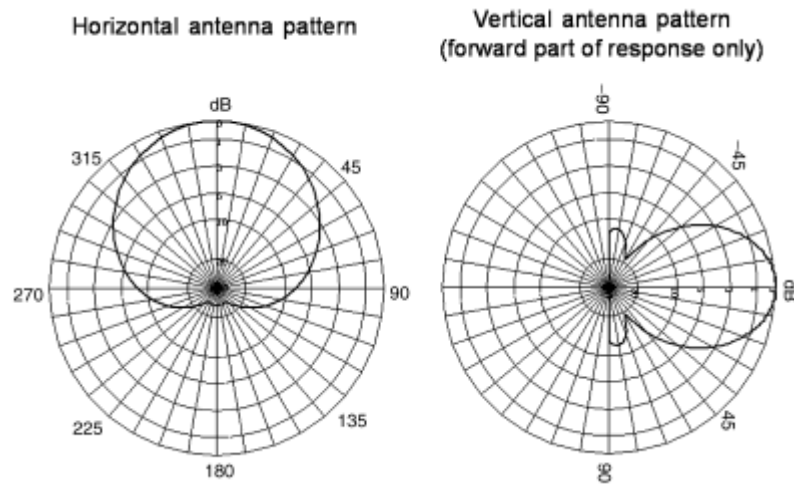


Ilustración 18 Diagrama polar de una antena direccional

#### 2.4.5 Antena móvil

Las antenas móviles, a diferencia de las antenas de base, suelen presentar ganancias muy pequeñas e incluso pueden llegar a contribuir pérdidas, esto debido a que deben cumplir con ciertos requisitos como ser livianas, pequeñas, y además baratas. Estas ganancias o pérdidas igual deben ser investigadas y consideradas en el balance de pérdidas de un enlace.

#### 2.4.6 Sensibilidad del receptor

Para el receptor, el valor más representativo de su desempeño es la sensibilidad del aparato de radio, lo que significa el mínimo nivel de señal en que el aparato puede asegurar cierto estándar de calidad de la comunicación. Por lo tanto, no hay solo un nivel de sensibilidad.

El límite inferior de sensibilidad está dado por el ruido térmico, que es la energía producida por el movimiento aleatorio de cargas asociadas al movimiento de electrones dentro del aparato receptor. EL valor de este ruido térmico depende de la temperatura al interior del aparato y de la banda de ancha utilizada, pero en general se puede aproximar por el valor  $-114 \text{ dBm/MHz}$ . A este límite teórico de sensibilidad se le agrega un factor de corrección, denominado factor de ruido.

Luego, dependiendo del tipo de modulación se necesita un valor mínimo de señal por sobre el nivel de ruido para asegurar un estándar de comunicación. Este es el valor que debería estar especificado para el equipo; luego, el mínimo nivel de señal perceptible en el receptor es la suma del ruido térmico más el mínimo nivel de señal “por sobre el ruido” (valor especificado para cada equipo receptor).



## 2.5 Cálculo de balance de pérdidas para el enlace

El resultado deseado en la tarea de diseño de radio enlaces puede ser: el nivel de señal que llega a receptor, en caso de tener determinadas las pérdidas de trayectoria, o por otro lado, encontrar los niveles máximos de pérdidas que permitan que el sistema funcione (que la señal que llega al receptor sea más alta que la sensibilidad del equipo receptor).

Para el cálculo del nivel de señal que llega a la antena receptora, debe realizarse una tabla tal como la Tabla 4 .

*Tabla 4 Ejemplo de cálculo de balance de pérdidas para un enlace de radio*

Elementos del enlace	Valor de pérdidas o ganancias	unidad	Cálculo realizado
Potencia nominal de salida del radio transmisor	41,5	dBm	
Pérdidas Feeders Tx totales	3	dB	
Pérdidas conectores Tx totales	1	dB	
Ganancia antena transmisora	2,5	dBd	
Potencia efectiva radiada	40	dBd	A-B-C+D
Pérdidas de trayecto	135	dBd	
Nivel en la antena receptora	-95	dBd	E-F
Ganancia antena receptora	-3	dBd	
Pérdidas Feeders Rx totales	1	dB	
Pérdidas conectores Rx totales	0,5	dB	
Nivel a la entrada del radio receptor	-99,5	dBm	G+H-I-J

Ahora, este valor de nivel de señal a la entrada del radio receptor debe ser considerado para evaluar si el sistema puede funcionar o no. Recordemos que no hay solo un nivel de sensibilidad, todo depende de la calidad de comunicación que se quiera lograr, el nivel de sensibilidad que un fabricante asigna a su producto depende de una norma de rendimiento adoptada.

Para realizar el cálculo del máximo valor de pérdidas de trayecto permitidas, entonces se realiza una tabla similar a la anterior, pero en donde la incógnita viene a ser la pérdida de trayecto y el nivel de señal a la entrada del radio se asume como el nivel de sensibilidad mínimo entregado por el fabricante del equipo receptor. Cabe señalar que generalmente a este valor de sensibilidad se le debe agrega un margen que asegure un nivel de señal mínimo a pesar de los efectos de desvanecimiento.

Como ya se discutió, las fórmulas y curvas utilizadas para estimar las pérdidas de trayecto, en general llevan a asociadas un porcentaje de disponibilidad de área y de tiempo de servicio. Esto significa que, al ser contrastados los resultados teóricos con mediciones empíricas, en términos estadísticos, las mediciones realizadas son mayores a las estimadas sólo para un porcentaje del área total considerada, y sólo para un porcentaje del tiempo total considerado. Esto quiere decir que, si se asume el valor de pérdidas de trayecto entregadas por estas fórmulas, y se realiza un balance de pérdidas y resulta ser que el nivel de señal que llega a radio receptor es igual a la

sensibilidad del receptor, entonces en verdad, dada la estadística del modelo, el nivel de sensibilidad sería alcanzado solo para un porcentaje del área total considerada, y solo para un porcentaje del tiempo. Para aumentar esos porcentajes es que se utiliza un factor de corrección, denominado margen de desvanecimiento, que permitiría por ejemplo aumentar el tiempo de servicio de 50% a 90%, si se tomara como nivel de sensibilidad, el mínimo entregado por el fabricante más un cierto margen.

## 3 Objetivos

### 3.1 Objetivos Principales

- Diseñar un sistema de telecomunicaciones que resuelva los problemas de comunicación entre los trabajadores que realizan labores de inspección a través del sistema de descarga de efluentes y el personal en planta de Celulosa Nueva Aldea, perteneciente a la empresa Celulosa Arauco y Constitución. Esta solución debe satisfacer los requerimientos de cobertura, costos, calidad en la comunicación y seguridad en la comunicación definidos por la empresa.
- Garantizar el buen funcionamiento del sistema propuesta mediante pruebas en terreno y herramientas de modelamiento teórico.

### 3.2 Objetivos Secundarios

- Investigar el funcionamiento del sistema de descarga de efluentes al mar de la planta Nueva Aldea, para determinar los puntos críticos de este mismo y que sucede en caso de una falla.
- Caracterizar el problema y definir cuál es el beneficio que otorgaría la solución propuesta.
- Evaluar el desempeño del modelo Longley-Rice para la predicción de niveles de intensidad de señal.
- Encontrar proveedores que suministren los dispositivos electrónicos y materiales de montaje necesarios para realizar el proyecto. Cotizar estos elementos y buscar las alternativas más convenientes para elaborar un balance de costos.

## 4 Antecedentes

A través del programa de memorias de Celulosa Arauco, se le asigna al alumno la tarea de solucionar un problema de conectividad en la planta Nueva Aldea, ubicada en el kilómetro 21 de la ruta Itata, en la VII región. El proyecto a desarrollar está subordinado al área denominada, Superintendencia de Electro Control, donde el Superintendente don Anatolio Navarro y el tutor de tesis don Mario Aldana, son las personas con quien se trabaja más estrechamente.

Como se explicó anteriormente, el objetivo del trabajo es dar cobertura de comunicación remota de voz para para la extensión de un ducto que conecta a la planta Celulosa Nueva Aldea con el mar, al cual se hará referencia como el *emisario*. Este emisario tiene una longitud de aproximadamente 54 kilómetros y va desde la planta de tratamiento de efluentes del Complejo Industrial Nueva Aldea hasta una zona de descarga al mar ubicado en el sector Boca Itata, en la costa de la VII región. En la Ilustración 19 se muestra un mapa con su extensión.



Ilustración 19 Trazado del sistema de descarga al mar

El emisario está dividido en secciones, cada uno delimitado por una cámara de sectorización, que no es más que una bóveda subterránea que contiene en su interior: una pequeña sección del emisario, una válvula, equipamiento de instrumentación y actuadores mecánicos. Pero es relevante señalar que poseen alimentación eléctrica y se encuentran interconectadas a través de una línea de fibra óptica para la transmisión de datos. En la Ilustración 20 se puede apreciar el interior de una cámara de sectorización.



*Ilustración 20 Vista interior de una cámara de sectorización*

La realización del proyecto de este sistema de descarga al mar tuvo difícil trámite, debido a la resistencia de la comunidad local a proyectos de esta índole, por las consecuencias medio ambientales que pudiese generar. Finalmente, el proyecto es aprobado a través de una resolución exenta el 2006, pero bajo importantes compromisos, entre los cuales figura un plan de contingencia ante eventuales fallas y a su vez un plan de prevención de fallas y de monitoreo. Es entendible además de que, si hubo problemas con la comunidad para la aprobación del proyecto, obviamente la comunidad estaría muy atenta respecto de la operación del emisario, lo que fuerza a la compañía a ser extremadamente cuidadosa.

Es acá donde toma lugar el proyecto de memoria, pues dentro del plan de prevención de fallas figura la existencia de un equipo de inspección del emisario. Este equipo trabaja fuera de la planta, recorriendo el emisario, y dada las características geográficas del lugar y la poca cantidad de antenas de red celular instaladas, se producen zonas donde no hay señal de telefonía móvil y este equipo de inspección queda incomunicado. La existencia de estas zonas de incomunicación, ante una situación de una emergencia, podría marcar diferencias importantes en el nivel de severidad que alcance el problema. A todo esto, se suma el hecho de que no contar con medios de comunicación adecuados entorpece cualquier tipo de maniobra de mantención que deba ser coordinada con planta.

#### 4.1 Sistema de conducción y descarga de efluentes al mar

Se trata un proyecto de la planta Nueva Aldea, perteneciente a la empresa Celulosa Arauco, cuyo objetivo es dar cumplimiento a la exigencia impuesta en la RCA 76/2005 de la Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA) VII Región, de poner en operación un sistema de descarga al mar de los efluentes generados por la CFI (Complejo Forestal e Industrial) Nueva Aldea. La construcción de este sistema es aprobada según la RCA 51/2006 de la Corema VII Región, donde además se establecen las condiciones de su funcionamiento. Luego, la entrada en operación sucede hacia finales del año 2009.

En la Ilustración 21 se presenta el trazado del sistema de descarga. La longitud total de la conducción es de 55km, iniciando en el CFI Nueva Aldea, pasando por las comunas de Ranquil, Coelemu y Treguaco, hasta llegar al sector Boca de Itata, donde se realiza la descarga al mar, mediante un difusor submarino.

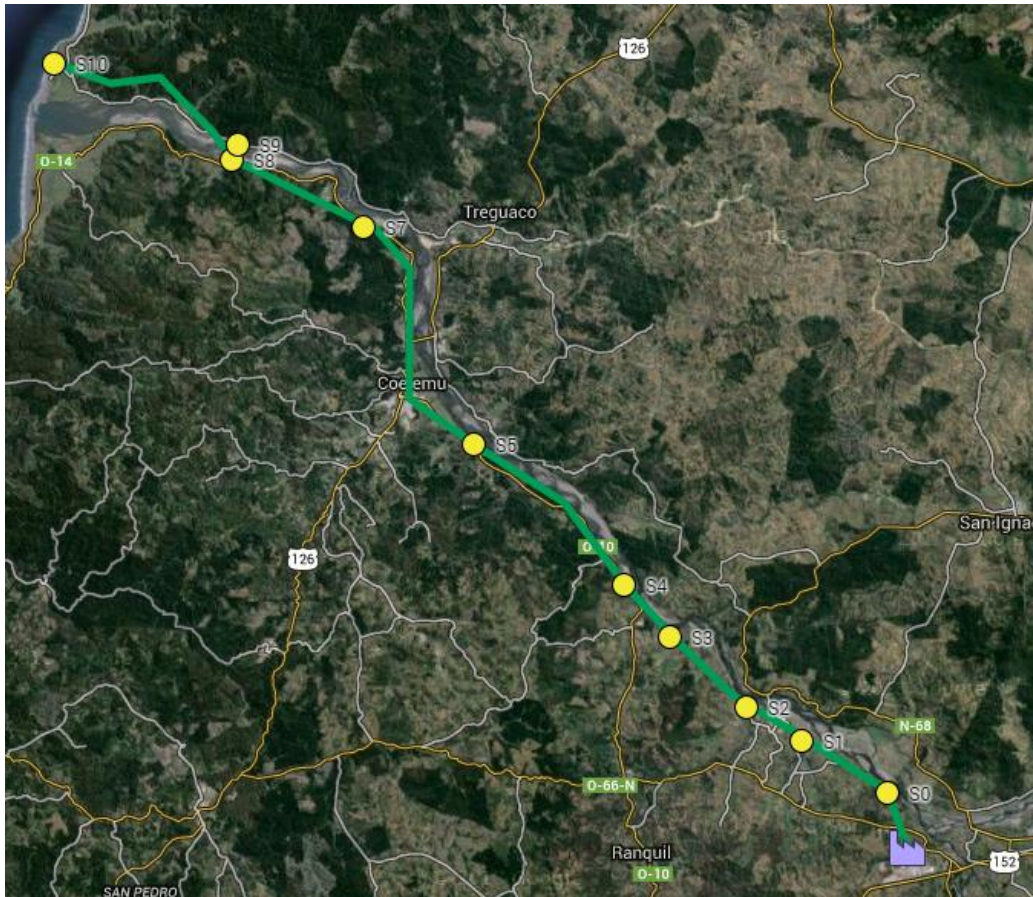


Ilustración 21 Trazado de emisario al mar (en verde), con cámaras de sectorización (en amarillo) y plata Nueva Aldea (en lila).

El sistema está conformado por:

- Planta Elevadora: donde se impulsa el efluente. Ubicada dentro de CFI Nueva Aldea. Como se dijo anteriormente la parte del sistema que está dentro de la planta no se estudiará en mayor profundidad, dado que para esa sección no existen problemas de comunicación.
- Emisario al río: Tiene un trazado de 800 m desde la Planta Nueva Aldea hasta la faja correspondiente a la línea del ferrocarril y posteriormente el trazado se desarrolla por dicha faja en una longitud de 2.835 m, en que se ubica una cámara denominada “cámara de bifurcación” (S0 en la Ilustración 21), desde la que se deriva la descarga de efluente al río o hacia el mar.
- Trazado por la faja del ferrocarril, desde la cámara de bifurcación hasta la entrada a la ciudad de Coelemu, de 25.885 m.

- Trazado por terrenos particulares y en túnel bajo calles, en el sector de Coelemu, de longitud 2.805 m.
- Trazado por la faja vial desde la salida poniente de Coelemu hasta antes de Meipo, por el camino de la ribera sur del río Itata, de longitud 13.100 m.
- Cruce aéreo del río Itata en el sector de Meipo, de longitud 780 m. Entre S8 y S9 en la Ilustración 21.
- Trazado por la faja vial del camino de la ribera norte del río Itata, desde el cruce del río hasta la cámara de carga final en Boca de Itata, de longitud 8.800 m.
- Emisario submarino en sector Boca de Itata de 2500 m a 30m de profundidad.

El sistema de conducción está construido con tuberías de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) marca Tehmco, de 1200 mm de diámetro y espesor 43,3 mm, en tiras de 12 y 18 mts. Estas tuberías están dispuestas subterráneamente. Las tiras son unidas mediante termo fusión, pero existen ciertas uniones mecánicas utilizando bridas sujetas con pernos y tuercas. Estas uniones mecánicas suceden cuando la tubería HDPE debe unirse a otros elementos del circuito, como los que se señalan más adelante. En la Ilustración 22 se muestra una sección descubierta del emisario, y se puede apreciar como luce una unión mecánica.



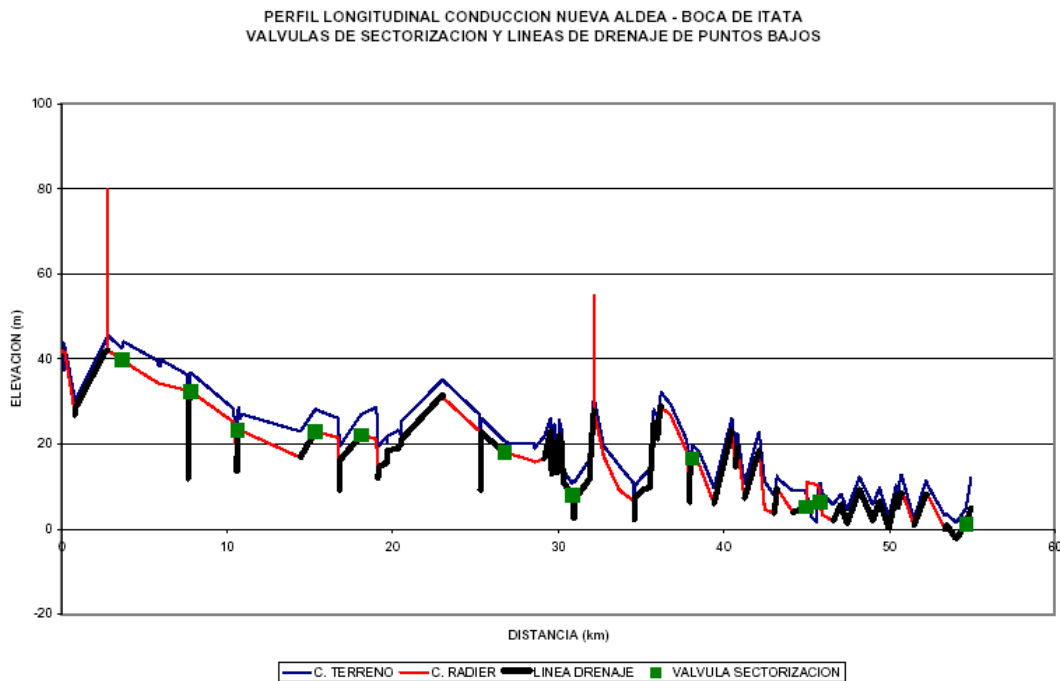
*Ilustración 22 Vista sección emisario*

El Caudal máximo de operación es de 1200 l/s, el caudal medio 860 l/s y caudal mínimo 300 l/s. Este caudal es impulsado mediante 2 bombas con capacidad de 600 l/s, además de una tercera que entra en funcionamiento en caso de falla en alguna de las otras 2. Estas bombas se encuentran dentro del CFI Nueva Aldea, en el sector de tratamiento de efluentes, en la denominada planta elevadora.

Además de la tubería HDPE y la planta elevadora, existen otros elementos que conforman el sistema de conducción. Estos son:

- ❖ Válvulas de Sectorización:
  - Separar conducción en tramos estancos de aproximadamente 4.000 m<sup>3</sup>. Sirven para minimizar daños en caso de fallas, como filtraciones, al permitir la aislación de sectores donde existan fallas.

- Válvulas motorizadas con accionamiento remoto.
  - Están normalmente abiertas.
  - 9 válvulas ubicadas a lo largo del trazado.
  - Se encuentran al interior de las denominadas cámaras de sectorización, que se muestran en la Ilustración 21, con nombres S1, S2..., S9.
- ❖ Sistema de conducción de desagüe:
- Circuito paralelo al sistema principal de conducción, de tuberías HDPE con diámetro 280 mm que sirve para realizar desagüe de efluente estancado.
  - Tiene una extensión de 18 km, conformado por segmentos que conectan puntos bajos en el trazado de conducción con puntos altos de desagüe.
  - Se necesita utilizar una bomba portátil con generador y carro, para impulsar efluentes a través del sistema de conducción de desagüe.
- ❖ Válvulas de desagüe en puntos bajos:
- Válvulas ubicadas en cámaras de inspección, en puntos bajos dados por el perfil longitudinal de la conducción.
  - Sirven para conectar puntos bajos en el sistema de conducción, con circuito paralelo de desagüe. Luego, desde ahí, con la ayuda de una bomba externa se puede impulsar efluente estancado hasta un punto alto de desagüe y entonces evacuar un segmento de conducción (entre válvulas de sectorización) para realizar maniobras de reparación. En la Ilustración 23 se puede apreciar los puntos bajos del trazado y en negro las secciones del circuito de desagüe que van desde un punto bajo a un punto alto.
  - Válvulas manuales, normalmente cerradas.
  - 23 válvulas de 250 mm y caudal máximo de 200 l/s.



*Ilustración 23 Perfil longitudinal emisario*



- ❖ Puntos de Desagüe:
  - 22 Válvulas manuales ubicadas en puntos altos del trazado de conducción, en donde se puede conectar sistema paralelo de desagüe, con sistema de conducción principal.
  - Permiten descargar al sistema de conducción principal efluente estancado bombeado desde puntos bajos a través del sistema de desagüe, Luego, el efluente sigue la conducción hacia aguas abajo, por gravedad.
  
- ❖ Estanque de Almacenamiento
  - Es un estanque ubicado en el sector norte del cruce del sistema de conducción sobre el río Itata (atraveso río Itata).
  - Por debajo del atraveso existe una canaleta que recoleta eventuales fugas del sistema conducción. El estanque recibe estas fugas para luego retornarlas al sistema de conducción, aguas abajo.
  - El estanque es de hormigón armado, tiene capacidad de 750 m<sup>3</sup> y cuenta con generador y 2 bombas, para sacar efluente recolectado.
  
- ❖ Cruce del Río Itata:
  - Parte aérea del trazado de conducción de largo 720 m, ubicado entre las cámaras de sectorización 8 y 9 (S8 y S9 en Ilustración 21). Cuenta con canaleta de recolección. Se muestra en la Ilustración 24.



*Ilustración 24 Cruce río Itata*

- ❖ Medidores de caudal:
  - 1 en Nueva Aldea, 1 en Boca de Itata y 3 distribuidos a lo largo de la conducción.
  - Permiten recibir en planta mediciones de caudal conducido y así identificar posibles fallas.

- ❖ Válvulas de venteo o ventosas
  - Ubicadas en puntos altos de la conducción.
  - Válvulas de venteo “trifuncionales”. Permiten ingreso de aire durante el vaciado, para evitar presiones negativas que puedan producir deformaciones del ducto. Permiten la salida de aire durante el llenado, para evitar la formación de grandes burbujas de aire en puntos altos que disminuyan la sección real de conducción. Además, tiene un sistema para evacuar burbujas de tamaño menor.
  - 26 válvulas ubicadas en cámaras de inspección. Una vista interior de estas cámaras de inspección se muestra en la Ilustración 25.



*Ilustración 25 Vista interior cámara de inspección ventosa*

- ❖ Válvula de control
  - Válvula ubicada en cámara de inspección, justo antes de la cámara de carga del emisario submarino.
  - Permite mantener la presión del sistema.
  - Operación automática desde el sistema de control en planta.
- ❖ Emisario submarino
  - Está compuesto de una cámara de carga, ubicada en la posición señalada como S10 en la Ilustración 21, y una tubería que se interna en el mar 2500 m, en cuyo final tiene montado un difusor, que es el punto de descarga al mar.

#### 4.1.1 Cámaras de sectorización

Es importante agregar más detalles de las cámaras donde se encuentran las válvulas de sectorización, que son las denominadas cámaras de sectorización. Estas cámaras, contienen las válvulas de sectorización, las cuales ya se explicó su utilidad, pero además cuentan con suministro eléctrico y conexión con una red de datos que comunica con las distintas cámaras y la planta.

El suministro eléctrico proviene de empalmes directos para cada cámara desde la red rural administrada por la empresa Copelec. Los empalmes son trifásicos de 380 Vac y alimentan un cargador de baterías con salida 24 Vcc, al que está conectado un banco de baterías con capacidad 200 Ah, además de todo el resto de la instrumentación y los actuadores. Se estima que el consumo de las cargas en cada cámara de 2,5 A, por lo tanto, el banco de baterías permite una autonomía de 80 horas. Existe una secuencia automática, programada desde el sistema de control distribuido (DCS), para la carga de las baterías; por lo que conectar nuevos equipos podría alterar el buen funcionamiento de esta rutina. Además, dentro de la cámara existen enchufes de 220 Vac, pero los cuales no están respaldados por el banco de baterías.

Existen diversos instrumentos en cada cámara de sectorización que están conectados con el sistema de control distribuido de la planta, y que permiten el monitoreo remoto del funcionamiento del emisario. Entre estos instrumentos están los medidores de presión y los medidores de flujo que son de vital importancia, pues con esos valores se determina la apertura de la válvula de control antes descrita, y porque son estos valores los que permiten identificar fallas. También está el control de las válvulas de sectorización, que permite detener en forma rápida y remota la conducción hacia un sector donde se detecte una falla, aminorando así la cantidad de efluente que pueda filtrarse.

Otros instrumentos de medición son los ubicados en la cámara de carga al mar, los cuales entregan valores de pH, conductividad, caudal y temperatura. Estos datos deben estar disponibles en línea y en tiempo real, donde las autoridades ambientales pueden comprobar el cumplimiento de las normas correspondientes. De este tema se habla en mayor profundidad más adelante.

Otros sensores componen el sistema de seguridad en las cámaras, como son:

- ❖ Medidor de H<sub>2</sub>S
  - Existe la posibilidad de acumulación de ácido sulfhídrico al interior de la cámara subterránea. Este sensor permite monitorear esa concentración, y determinar si las condiciones son o no adecuadas para el ingreso de personal.
- ❖ Transmisor de nivel de inundación
  - Se ha equipado a las cámaras con transmisores de nivel los cuales envían una señal a la sala de control cuando detecta una columna de agua en el piso de la cámara subterránea.
- ❖ Sensor de Humo
  - Para detectar situaciones en que algún componente comience a emitir humo. De esta forma se puede reaccionar, y evitar la generación de incendios.
- ❖ Sensor de H<sub>2</sub>
  - Si las baterías son sometidas a descargas fuertes o rápidas pueden generar H<sub>2</sub> el cual se desprende en forma de gas. Estas variables se despliegan en pantallas de la sala de control.
- ❖ Cámaras de CCTV
  - Se ha incluido un total de tres cámaras de CCTV (Circuito Cerrado de TV), dos a cada lado del atraveso sobre el río Itata y una en la cámara de carga del emisario submarino. Las cámaras son fijas y están equipadas con caja a prueba de intemperie y lente verificar. El objetivo de estas cámaras es servir para supervisar el acceso al puente que existe a los costados del cruce aéreo del ducto.
  - La cámara ubicada en la estación cámara de carga emisario submarino sirve para detectar la condición del efluente en ese punto, atascos etc. Las cámaras son con tecnología Ethernet y su señal es enviada a la planta.

- ❖ Detector de movimiento.

- Corresponde a detectores de movimiento infrarrojo pasivos instalados dentro de las cámaras. Sirven para detectar la entrada de personas a la cámara subterránea.

#### 4.1.2 El personal de inspección del emisario

El personal de inspección del emisario está conformado por 3 turnos de 2 personas que realizan rutinas de inspección en el emisario, cada equipo durante 8 horas, entonces entre los tres completan el día. Estos equipos se movilizan en camioneta siguiendo una rutina de inspección, pero a la vez deben estar atentos a los llamados desde planta que les indiquen atender contingencias. Frecuentemente el personal tiene problema para recibir estos llamados, pues el único medio con el que se cuenta es el teléfono celular y esta red no entrega buena cobertura para varios sectores por los que transitan, especialmente al interior de cámaras subterráneas que es donde se desarrollan la mayoría de las labores de inspección.

Entre las labores realizadas por el personal de inspección del emisario destacan:

- ❖ Comprobar coherencia entre valores entregados por instrumentos en terreno, y valores recibidos en planta. Y si no, realizar maniobras de calibración.
- ❖ Realizar inspección visual, en búsqueda de posibles filtraciones, en caso de que valores sospechosos de presión o flujo sean detectados en planta.
- ❖ Inspección visual de cámaras de sectorización. Revisar nivel de inundación, nivel carga de baterías, estado de bornes de batería, estado de válvulas de sectorización. Cualquier olor o ruido extraño también debe ser considerado.
- ❖ Revisar estado de otras cámaras de inspección. Se debe comprobar el estado de válvulas manuales y su hermeticidad, revisar el estado de los sellos de las ventosas, comprobar buen funcionamiento de medidores de caudal y estado de inundación de cámaras.
- ❖ Transporte de bomba con generador a terreno para realización bombeo desde sistema de conducción principal, a circuito de desagüe. Esto en caso de fallas, y en caso de necesidad de labores de mantenimiento programadas.

En el manual de operación del emisario, se indica que cualquier situación anómala debe ser comunicada inmediatamente al personal de tratamiento efluentes (en planta) en forma telefónica. Pero ya se ha señalado que la telefonía presenta importantes limitaciones.

#### 4.1.3 La Resolución Exenta N°51/2006

La Resolución Exenta N°51/2006 de la Corema de la octava región, es la resolución que aprueba la construcción del emisario al mar, y que además norma su funcionamiento. Esta resolución define el modo de actuar ante fallas de diversa índole en el sistema de conducción o en el tratamiento de los efluentes emitidos. Del mismo modo, se presentan las medidas de seguridad que la compañía se compromete a respetar

.

Entre las medidas de seguridad se incluye la disposición de ciertos elementos, cuya función ya fue descrita anteriormente, que son las válvulas de sectorización, el sistema de drenaje, la válvula de

control, los sensores de presión y los medidores de caudal. A estos elementos, se agrega el variador de frecuencia asociado a las bombas de impulsión, que permite disminuir el flujo emitido, en caso de ser necesario.

Igualmente se detalla el plan de monitoreo especial del efluente que contempla el muestreo y análisis del efluente a la salida de la planta y al final del sistema de descarga, para el registro continuo y en línea del caudal, pH, Temperatura y Conductividad. A lo que se agrega un seguimiento diario en los laboratorios del complejo de los siguientes parámetros: DQO, DBO5, Halógenos Absorbibles Orgánicamente (AOX), color, sólidos suspendidos totales (TSS), nitrógeno total, fósforo total, cloruros, ácidos resínicos, ácidos grasos y clorofenoles.

Con respecto a la operación del sistema en situación de emergencia, se señalan dos tipos de posibles fallas:

- Alteraciones en la composición del residuos líquido industrial (RIL) emitidos desde la planta de tratamiento.
- Rupturas o filtraciones en sistema de conducción al mar.

Para el caso de la alteración en la composición de RIL, se indica la derivación a lagunas de derrame ubicadas en el CFI Nueva Aldea. Estas lagunas tienen capacidad de 80000 m<sup>3</sup>, lo que equivale al volumen generado por el complejo en 26 horas.

Para el caso de ruptura de sistema de conducción, se indica que en caso de detección de una falla debe darse aviso inmediato a las autoridades ambientales, por parte de la Gerencia de Planta del CFI Nueva Aldea y en forma paralela se debe activar la descarga a lagunas de derrame, además de iniciar el procedimiento de mantención correctiva.

Procedimiento de Mantención correctiva:

- Detención de la operación de la conducción.
- Activación de las válvulas de sectorización, que son operadas remotamente desde la Sala de Control de la conducción. Estas válvulas, una vez cerradas definen tramos estancos en el ducto. El tiempo mínimo de activación de estas válvulas es de 2 minutos.
- Apertura de las válvulas de sectorización ubicadas aguas abajo del tramo que requiere reparación, el cual quedará con sus compuertas de aguas arriba y de aguas abajo cerradas.
- Operación del sistema de desagüe en puntos bajos que permiten el drenaje de un sector estanco en particular.
- Corrección de la falla.

Se incluye entre la información mostrada en la resolución, una tabla donde se compara la concentración de contaminantes del efluente conducido con los valores máximos de emisión establecidos en las normas DS 90 (“Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”) y DS 46 (“Establece Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas”)

Tabla 5 Comparación efluente emitido con normas ambientales

Parámetros	Efluente emitido	D.S.N°90 Límite Máx	D.S.N°46 Límite Máx
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	33,3	35	No normado
DQO (mg/l)	560	No normado	No normado
TSS (mg/l)	42,7	80	No normado
AOX (mg/l)	10,67	No normado	No normado
Color (mg/l)	1.120	No normado	No normado
Nitrógeno total (mg/l)	6,67	50	10
Fósforo total (mg/l)	2,7	10	No normado
pH	6,5 - 8,5	6,0 – 8,5	6,0 – 8,5
Temperatura (°C)	<35	35	No normado

En esta tabla se puede apreciar como el efluente emitido, el cual recibe tratamiento secundario, tiene una mejor calidad en comparación con las normas medioambientales. Así, la resolución plantea que estos valores, en conjunto con las medidas de seguridad con las que cuenta el emisario al mar, permiten concluir que:

“De lo anterior se deduce claramente que, aún en caso de eventuales roturas del sistema de conducción de efluentes, las descargas temporales y de reducido volumen que se puedan producir, no generarán contaminación de cursos de agua (ya sea el río Itata u otro curso de agua aledaño) y/o suelo”

Un último punto de relevancia que se incluye en la resolución ambiental, es el modo de operar ante situaciones en que una falla no se logre solucionarse en el transcurso de las 26 horas durante las cuales se puede derivar el efluente hacia las lagunas de derrame las lagunas de derrame. Entonces, se debe activar el tratamiento terciario para los riles y se permitiría la descarga directamente al río Itata, pero con ciertas limitaciones sobre la producción. En este sentido, cuando el caudal del río Itata en la estación Paso Hondo (la estación de monitoreo más cercana) sea entre 7 y 10 m<sup>3</sup>/s, podrá producir en promedio 856.000 ADt/año (Air Dry metric ton); cuando el caudal del río sea entre 7 y 3,4 m<sup>3</sup>/s, podrá producir 550.000 ADt/año y bajo 3,4 m<sup>3</sup>/s, no podrá descargar riles al río Itata. Para entender la magnitud de estas restricciones, se incluye la información de caudal para la estación Paso Hondo del río Itata, disponibles en la DGA (Dirección General de Aguas), donde se observa como el caudal medio mensual desde el año 2000 nunca ha estado por debajo de los 12,02 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 6 Caudales medios mensuales en m<sup>3</sup>/s para estación Paso Hondo del río Itata

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1986	68,98	65,35	56,55	192,66	725,71	1098,97	414,46	568,73	329,01	226,63	221,82	72,78
1987	30,70	14,21	25,74	72,69	99,63	274,51	895,77	855,59	529,92	544,13	304,42	70,55
1988	18,19	10,32	16,04	48,03	87,24	197,37	518,99	840,95	405,70	247,68	171,22	76,61
1989	23,14	8,57	6,48	12,56	22,01	145,00	395,31	469,45	305,18	178,17	82,59	25,27
1990	5,98	2,55	8,02	108,28	173,46	136,63	153,43	308,59	573,66	304,05	130,23	16,83
1991	3,41	7,01	0,47	65,54	260,30	512,80	754,79	338,78	463,32	290,01	154,35	109,90
1992	49,90	12,28	17,34	120,97	347,14	1202,39	606,70	376,07	448,31	359,36	253,26	151,72
1993	62,41	10,17	8,66	125,30	433,98	1187,72	869,20	683,29	449,87	281,63	196,70	145,49
1994	49,58	23,22	14,78	101,44	183,54	380,54	920,93	436,90	522,01	395,44	195,20	118,46
1995	31,01	14,27	11,27	69,68	109,10	405,76	848,39	648,65	552,77	361,29	214,80	110,63
1996	30,09	8,94	32,00	112,56	80,57	253,07	268,94	325,12	213,82	96,26	37,99	13,70
1997	35,14	6,10	2,73	175,97	101,25	990,94	597,81	643,58	701,87	688,02	458,49	176,11
1998	40,20	18,55	8,16	68,50	121,92	144,13	188,79	189,92	153,73	54,05	35,74	129,99
1999	27,46	43,03	13,59	46,51	81,42	281,56	376,17	514,60	1047,77	326,08	204,04	83,86
2000	14,71	67,52	19,02	24,51	98,40	720,45	863,81	604,62	843,72	452,96	215,42	123,87
2001	83,67	69,18	24,45	79,10	793,54	534,12	1587,82	892,48	466,60	281,48	160,88	71,11
2002	23,84	36,72	29,89	133,69	442,29	454,19	459,94	1193,04	659,89	870,78	432,39	208,58
2003	77,75	29,66	31,15	73,46	91,04	539,79	485,85	342,26	339,84	327,53	179,22	55,27
2004	14,04	12,01	15,16	271,16	108,80	316,25	605,68	460,15	447,12	297,22	262,44	102,04
2005	45,13	34,40	34,26	59,32	300,69	682,26	1083,97	1061,23	533,81	282,77	207,31	145,20
2006	72,25	29,02	33,51	144,82	180,79	640	1.155,39	740,61	546,67	461,39	255,73	143,98
2007	64,9	55,38	45,39	70,24	79,99	82,4	427,71	325,65	302,28	242,65	115,76	41,34
2008	17,2	18,62	18,42	46,19	761,77	496,5	487,84	779,61	481,37	228,81	128,67	58,51
2009	22,27	13,52	15,36	37,01	312,53	457,93	575,77	657,9	478,1	303,71	277,27	117,39
2010	41,23	31,29	16,61	23,29	50,64	212,32	329,84	308,16	261,7	195	148,91	62,24
2011	35,64	20,9	31,56	75,87	78,08	235,82	366,58	603,77	450,8	328,80	201,96	92,93
2012	34,32	46,89	44,89	139,84	34,21							

#### 4.1.4 Historial de fallas del emisario

Se considera poco adecuado incluir en este documento información tan delicada como el historial de fallas del emisario, pues la idea sería que este trabajo de memoria pueda ser disponible públicamente. Lo que sí se puede señalar es que la tendencia en el historial es clara, casi todas las fallas detectadas corresponden a filtraciones en uniones mecánicas entre la tubería HDPE y los otros elementos del sistema, así como fugas desde válvulas ventosas.

#### 4.1.5 Proyecto de radiocomunicaciones para el emisario rechazado anteriormente

Un valioso antecedente encontrado es una propuesta técnica realizada por la empresa de telecomunicaciones Esmeralda S.A. y presentada a la Gerencia de Ingeniería de la planta en el año 2010. El proyecto propuesto consistía en la instalación de estaciones de radio con convertidores IP en las cámaras de sectorización del emisario, pero fue rechazado. Al consultar a uno de los ingenieros involucrados en el proceso de evaluación del proyecto, este respondió que el proyecto sólo fue rechazado por el costo de su implementación, que ascendía a los \$30.000.000.

#### 4.2 Red de radio existente en la planta

Dado que el acercamiento previo a lo que son las comunicaciones por radio es muy escaso, el primer paso es interiorizarse en el tema estudiando la red de radio instalada la planta. Esta red de radio consta de una estación base, de 6 repetidoras conectadas cada una a una consola de control, y estas consolas se interconectan para conformar un sistema de *trunking* lógico análogo (sistema *trunking* es un sistema de administración automático de los recursos de radio, en donde un canal de control indica que canal de frecuencia se utiliza para cada conversación). Las 6 repetidoras funcionan en modo *dúplex* (reciben en una frecuencia dada y transmiten a otra frecuencia 5 Mhz menor). El ancho de canal es de 12,5 kHz y la modulación es analógica FM. La banda utilizada por estos canales es la banda UHF y las frecuencias son los mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7 Frecuencias utilizadas por repetidoras en planta

Repetidora	Tx (MHz)	Rx (MHz)
Administración	502,500	507,500
Mantenimiento	502,550	507,550
Operación	502,600	507,600
Nueva Aldea 1	502,575	507,575
Nueva Aldea 2	502,625	507,625
Nueva Aldea 3	502,650	507,650

Estas frecuencias fueron aprobadas para el uso en la red de la planta mediante la Resolución Exenta N°645 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. Luego, la disposición actual fue aprobada mediante una modificación al permiso anterior en la Resolución Exenta N°645.

Para realizar la transmisión y recepción, simultáneamente y utilizando una sola antena, se utilizan duplexores (uno por repetidora) evitándose interferencias entre las señales. Las antenas utilizadas son antenas omnidireccionales de fibra de vidrio. Además, la red es conformada por 21 estaciones fijas, 2 estaciones móviles y 380 estaciones portátiles, que son utilizadas por los trabajadores, dentro de la zona de cobertura de las estaciones repetidoras.

Las estaciones portátiles, móviles y fijas tienen programados 8 canales que corresponden a grupos de conversación que se comunican en modo *semidúplex* (se utilizan 2 canales distintos para transmitir y recibir, pero no realiza transmisiones y recepciones en forma simultánea), utilizando las repetidoras *trunking*, y otros 8 canales convencionales que permiten comunicación simplex directa entre terminales, sin pasar por las repetidoras.



Los canales de radio frecuencia del sistema *trunking* van siendo asignados a los distintos grupos de conversación en forma dinámica, por lo tanto, una conversación ocurre a través de una sucesión de canales, esto permite un cierto grado de seguridad en la comunicación. Además, el sistema *trunking* incluye un sistema de identificación para los terminales que se conectan, denegando el acceso a terminales no identificados.

El sistema *logic trunking*, que es el utilizado en este caso, no tiene canal de control exclusivo y toda la información de control es transportada en el mismo canal que el mensaje de voz, pero utilizando tonos sub audibles. Específicamente, el sistema *trunking* está compuesto por la siguiente lista de equipos:

- equipos repetidores Kenwood TKR-750.
- duplexores Telewave Inc. TPRD-474
- *trunking* repeater manager Connect System Inc. LT-4900

Además, los equipos utilizados como estaciones móviles y portátiles corresponden a:

- Radio móvil UHF FM Kenwood TK-880. Este mismo modelo es utilizado en algunas estaciones fijas, para las cuales conjuntamente se utilizan antenas UHF Ringo Ranger II marca Cushcraft.
- Radio portátil UHF FM Motorola PRO7350

Al estudiar el sistema también se obtiene información interesante para el desarrollo del proyecto, como que al ser un sistema *trunking* sería incorrecto conectar directamente la señal de voz que provenga del sistema de radio del emisor a alguna repetidora, pues cada canal va transmitiendo dinámicamente mensajes de distintos grupos de conversación. Entonces cualquier elemento que se conecte a la red debe tener la capacidad de cambiar constantemente de canal de radio frecuencia, lo que no es posible si se conecta una señal directamente a una repetidora. Esto último, solo produciría que el audio desde el emisor interrumpa un grupo de conversación cualquiera. Por lo tanto, la señal que se quiera ingresar a la red debe hacerse por medio de una estación registrada en la red que sea compatible con el sistema *trunking*.

### 4.3 Red de fibra óptica en el emisor

La red de fibra óptica está compuesta por 10 estaciones (correspondientes a las cámaras de sectorización del emisor) entre las cuales existen cables mono modo de 12 hebras. En cada estación hay 2 switches marca Hirshman, modelo RS-20, uno se utiliza para transmitir los datos de la instrumentación de cada estación y el otro se utiliza para la transmisión del video de unas cámaras de vigilancia. Cada uno de estos switch se conecta mediante dos hebras a un switch en la siguiente estación y mediante dos hebras a un switch en la estación anterior. Estos equipos funcionan como amplificadores de la señal transmitida en la fibra óptica y se encargan de realizar la conversión de medios a *Ethernet*. La topología de la red es de línea.

El switch al que se conecta la instrumentación cuenta además con una red inalámbrica de respaldo. Esta red es administrada por una empresa externa y la capacidad de los enlaces de respaldo es 128/256 Kbps (subida/bajada). Dado el poco ancho de banda con el que cuenta este canal y la

importante información que respalda, no debería tomarse en cuenta como recurso para la solución a desarrollar. El otro switch sólo transmite la información proveniente de 3 cámaras de vigilancia y de unos teléfonos IP instalados en cada cámara de sectorización. Puesto que el enlace dedicado es de 100 Mbps, claramente existe espacio para comunicar más dispositivos a través de este circuito (aseveración confirmada por los ingenieros a cargo de la red).

La red de switches del emisario permite transmisión de paquetes Multicast, lo que probablemente sea una característica útil si se desea conectar múltiples equipos que interactúen en esta red. Es importante señalar que esta es una red cerrada, de arquitectura muy simple y, por lo tanto, no debería haber problemas en trabajar con ella. Todos los switches pueden ser configurados desde una sala de control en la planta.

## 5 Caracterización del problema

El análisis de los antecedentes recopilados revela que el verdadero problema con el que se lidia es asegurar el buen funcionamiento de un sistema de descarga al mar. Las consecuencias de una falla de este sistema pueden ser estudiadas desde distintas perspectivas, y luego de revisar los antecedentes del caso, se caracteriza el problema como uno de múltiples factores, que se definen como: sociales, medio ambientales y económicos. Además, el buen funcionamiento del emisario se considera un problema mecánico y eléctrico.

Lo relevante del factor medio ambiental es la existencia de una Resolución Exenta (R.S. 51/2006) que norma el funcionamiento del emisario al mar. Acá se definen los límites de calidad de los residuos emitidos y la obligatoriedad de que estos datos sean medidos en forma precisa y notificados en tiempo real a la autoridad medio ambiental. El sistema de instrumentación — dedicado a realizar estas mediciones— es una componente crítica en el problema; lo que se demuestra con el testimonio de personal de inspección del emisario, quienes admiten que la tarea más común en sus rutinas es la calibración y la comprobación del buen funcionamiento de estos equipos.

Por otro lado, la resolución medioambiental también incluye el plan a seguir en caso de fallas en el sistema de conducción (que se describe en la sección de antecedentes específicos). También se comprueba que los límites de concentración de contaminantes impuestos a los residuos emitidos por la planta son más exigentes que los límites expresados en el D.S N°90 (“Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”). Es por eso mismo que la resolución ambiental indica:

“De lo anterior se deduce claramente que, aún en caso de eventuales roturas del sistema de conducción de efluentes, las descargas temporales y de reducido volumen que se puedan producir, no generarán contaminación de cursos de agua (ya sea el río Itata u otro curso de agua aledaño) y/o suelo” (Res. Exenta N°51/2006, 2006 pág. 42)

Esta última afirmación permite considerar el tema medio ambiental como un problema de acotada gravedad. Siendo la responsabilidad más relevante el mantenimiento de los sistemas de medición y de accionamiento remoto (considerados entre las medidas de contingencia). Como todos estos instrumentos se encuentran al interior de las 9 cámaras de sectorización del emisario, se concluye que son estas cámaras los puntos más críticos del sistema de telecomunicaciones a diseñar.

Respecto al plano económico existen tres temas de cuidado en caso de una falla del emisario:

- Si la falla se extiende por más de 26 horas, entonces se comienza a descargar los residuos al río. La regulación es más exigente cuando se trata de descargas al río, lo que hace imprescindible una etapa terciaria de tratamiento de los riles, lo que incrementa los costos de producción. En caso de descarga al río se establecen limitaciones a la producción de la planta cuando el caudal del río baje de 10 m<sup>3</sup>/s en la estación de medición Paso Hondo. Aunque al revisar la información de la Dirección General de Aguas (DGA), se confirma

que desde el año 2000 y hasta el 2012, las cifras de caudal promedio mensual en esta estación nunca han bajado de los 12,02 m<sup>3</sup>/s.

- Multas económicas y otras acciones legales en caso de incumplimiento de compromisos estipulados en la resolución de calificación ambiental. Los montos de estas multas no salen estipulados en la norma.

En el plano social no es mucha la información existente, pero se logra averiguar que muchas veces los propios pobladores del sector han sido los que han dado el aviso ante fallas del emisario. Esto produce que carabineros, policía de investigaciones y autoridades gubernamentales locales se involucren en el problema, lo que dificulta las labores de corrección de la falla. Según don Anatolio Navarro (Superintendente del área de electro control de la planta), efectivamente, el tema más relevante respecto a las fallas del emisario son los posibles problemas con la comunidad que eso pueda acarrear.

Finalmente, está el problema mismo del funcionamiento del emisario, con raíz en la mecánica del transporte de fluidos. Con respecto a esto, el historial de fallas del emisario permite concluir que los puntos críticos del sistema son las uniones mecánicas, donde sucede la mayoría de las filtraciones. De las demás componentes del sistema las que han producido problemas más graves son las denominadas “ventosas”. Una falla en una ventosa puede producir la rápida expulsión de gran volumen de fluido desde el ducto —en una especie de explosión— lo que hace mucho más notoria la falla.

Luego, se concluye que los puntos críticos del sistema son en primer lugar, las cámaras de sectorización, que albergan la instrumentación que permite monitorear el buen funcionamiento del emisario y las válvulas de sectorización (permiten detener los flujos de efluente en caso de falla); en segundo lugar, las cámaras que contienen las ventosas, por la magnitud de las fallas que pueden ocurrir ahí, y en tercer lugar, todas las cámaras de puntos bajos y cámaras de descarga que, junto a las ya consideradas cámaras de sectorización y de ventosa son los lugares donde se encuentran las uniones mecánicas entre la tubería HDPE y otras componentes (puntos más propensos a fallas). En el resto de la extensión del emisario no existen uniones mecánicas, solamente tubería HDPE unida por termo fusión, donde no se registran fallas.

Es importante señalar que el sistema de comunicaciones a desarrollar en esta memoria está dedicado sólo a la comunicación entre planta y el personal de inspección del emisario. Este equipo de inspección tiene acceso al ducto en todas las cámaras antes mencionada pero, donde no hay cámaras, el ducto se encuentra bajo tierra y el camino por el que ellos transitan no sigue exactamente el trazado del emisario, lo que limita las acciones que ellos puedan realizar y la utilidad del sistema de comunicación. Entonces, el trazado del ducto fuera de los puntos de ubicación de cámaras del emisario y el camino seguido por el personal de inspección; se considera la cuarta prioridad para el sistema de comunicación.

El sistema de comunicación que se busca diseñar, no podría solucionar el principal problema — que es evitar fallas en el funcionamiento del emisario— pero si ayuda a agilizar las maniobras en terreno que se requieran en ciertas eventualidades. Además, facilita las maniobras de rutina, lo que

permitiría realizar mayor número de maniobras de rutina por día y entonces disminuir la posibilidad de fallas. Según el testimonio de personal del equipo de inspección, una de sus tareas más recurrentes es calibrar instrumentos. Para esto se necesita comparar los valores recibidos en planta con los valores que ellos miden en terreno, lo que se vuelve muy difícil si no existe buena comunicación pero sería muy simple si existiese una confiable y cómoda forma de comunicación móvil.

## 5.1 Requerimientos y limitaciones

Finalmente, se entiende que la principal limitación para el desarrollo de la solución es el costo. Esta idea se sostiene en el antecedente de que un proyecto (de similares características) ya fue rechazado justamente por su valor. También se cuenta como una limitación el hecho de que para la compañía expresa la incomodidad que le generaría el tener que comprar nuevos terrenos e instalar otras estaciones (a parte de las existentes). Por lo tanto el diseño se debe adecuar a las instalaciones con las que se cuentan, es decir, las cámaras de sectorización.

Otra limitación es el tipo de banda de frecuencia que se puede utilizar para desplegar una red de radio. Esto se descubre al estudiar la Ley General de Telecomunicaciones y el Marco Técnico de los Servicios Limitados; donde se indica que para la VII región hace muchos años que la banda VHF se encuentra colapsada, y por lo tanto no queda más alternativa que la utilización de la banda UHF. El marco normativo también limita el ancho de canal que puede utilizarse en 12 kHz y la potencia de la estación de base, que no puede superar los 25W. En caso de transmitir a 25W tampoco está permitido utilizar antenas de más de 6dB de ganancia (en la dirección de máxima ganancia).

Los requerimientos son definidos en conjunto con la gente del Área de Electro Control de la planta. Entre estos requerimientos, el primero es que el sistema de comunicación debe ser móvil y portátil. También se espera que permita la comunicación simultánea de grupos de personas y que sea cómodo de utilizar mientras se realizan labores en terreno, esto hace clara referencia a la comodidad que brindan las radios de 2 vías utilizadas en la planta. Además, debido a una mala experiencia previa con el uso de teléfonos satelitales, se descarta los tipos de soluciones que involucren comunicación satelital.

El sistema además debe ser capaz de funcionar en caso de cortes de energía, es decir, debe contar con cierto tiempo de autonomía. La seguridad de las comunicaciones es también un tema importante a considerar. El sistema debe ser capaz de evitar que intrusos puedan escuchar las conversaciones y evitar que mensajes indeseados sean recibidos.

Otro requerimiento, señalado expresamente por las autoridades de la planta, es que el sistema de comunicación debe evitar hacer uso de redes externas (como el caso de redes celulares públicas); esto debido a que la comunicación con el emisario no puede depender de la disponibilidad de una red pública, es decir, no puede ser interrumpida por eventualidades como por ejemplo, congestiones de red. Esto último, un hecho que ocurre habitualmente ante desastres naturales, momentos en que las comunicaciones en el emisario resultarían incluso más críticas.

Una última cuestión a tomar en cuenta es una simplificación del problema. Esta simplificación considera que, si bien, la solución ideal debería proporcionar cobertura al 100% de los sectores por donde transita el equipo de inspección del emisario, las zonas críticas que necesitan cobertura son todas las cámaras de sectorización. Que es donde el personal de inspección realmente puede realizar labores de inspección.

## 6 Metodología

La metodología finalmente utilizada responde a un orden lógico de trabajo. Comienza con la recopilación de antecedentes, los cuales se exponen en la sección anterior. Estos antecedentes son de 2 tipos: los que ayudan a entender el marco en el que está inmerso el proyecto y los que sirven para estimar los elementos con los que se cuenta para realizar el proyecto. Aquí se busca entender el funcionamiento del supra sistema que demanda la solución de telecomunicaciones.

Otra parte del trabajo realizado es la revisión del estado del arte, en cuanto a la ingeniería de telecomunicaciones. Esto, para aprender acerca de los métodos disponibles para el diseño de una solución de radiofrecuencia, lo cual está expuesto en la sección marco teórico. Durante esta etapa de estudio, la teoría de radiocomunicaciones permite determinar cuáles son los factores que deber considerarse en el diseño, y cuales carecen de relevancia. Por ejemplo, la literatura indica que para la banda UHF (banda de frecuencia disponible) las precipitaciones no son un factor que influya mayormente en el desempeño de un enlace de radio, así como tampoco la curvatura de los frentes de onda debido a efectos refractivos.

Luego de conocer el funcionamiento del supra sistema (para el cual se está diseñando la solución) y el marco conceptual (que explica la forma de operación de las posibles soluciones), se está en condiciones de poder definir las directrices del diseño. Esto constituye un tercer paso en el proceso de resolución y es cuando se realiza el intercambio de ideas con el cliente (personal de área de electro-control y personal de inspección del emisario) para poder definir los requisitos del sistema que satisfaga las necesidades del caso.

Tras contar con los requerimientos de la solución se diseña y ejecuta una rutina de pruebas en terreno. La idea de estas pruebas es comprobar el comportamiento real del ambiente respecto a la propagación de ondas de radio. También se busca validar el marco conceptual estudiado para verificar la confiabilidad de los preceptos y asunciones que sugiere la teoría. Para comprobar esto se necesita de un método de validación y un modelo que entregue valores comparables con los resultados en terreno. Entonces, el siguiente paso metodológico es la elección de un modelo adecuado y la creación de un método de validación. Todo lo anterior, intentando utilizar la menor cantidad de recursos posibles. El modelo elegido es el de Longley-Rice y el modo de validación es la comparación de mediciones georreferenciadas, con los gráficos de cobertura entregados por el software Radio Mobile, el cual se basa en el modelo de Longley-Rice. Dada la limitación económica, se realiza una validación a partir de la comparación dentro de un mapa entre las mediciones hechas en terreno y las zonas de coberturas entregadas por el software. Esta validación no se basa en mediciones numéricas, pues no se cuenta con los instrumentos necesarios y sólo se utilizan tres categorías: nivel de señal bueno, con interferencia, y sin señal. Los detalles de la prueba y de la forma de realizar la validación del modelo se explican en las siguientes secciones.

Tras verificar la validez del modelo, de los parámetros de entrada y del software, se diseña la red de radio, utilizando la herramienta computacional para probar el desempeño de distintas opciones. Esto último, con el objetivo de disminuir en lo más posible los recursos necesarios para cumplir

los objetivos señalados en la sección de Requerimientos y limitaciones. Con el diseño determinado se procede a revisar la oferta del mercado, elegir la solución más económica y que mejor se ajuste a los requerimientos del problema, lo que se discute en la sección Selección de solución.

El resultado final es un proyecto de implementación en el cual se indica el equipamiento necesario para poner en funcionamiento un sistema de comunicación móvil de radio, junto a una estimación de los costos necesarios, el tiempo de ejecución, y la forma de llevar a cabo los trabajos. Este proyecto es el que debe ser presentado a la gerencia de ingeniería de la planta, para su aprobación.

Resumiendo, se puede decir que la metodología utilizada sigue los siguientes pasos:

1. Levantamiento de antecedentes.
2. Revisión de estado del arte.
3. Definición de directrices de diseño.
4. Pruebas de cobertura en terreno.
5. Elección y validación de un modelo de propagación a partir de los resultados de las pruebas en terreno.
6. Selección tecnológica y determinación de elementos necesarios para instalar el nuevo sistema de telecomunicaciones. Apoyándose en las herramientas de modelamiento ya validadas.
7. Cotización de elementos y estimación de la inversión necesaria.
8. Elaboración de un plan de implementación.



## 7 Resultados

### 7.1 Pruebas de radio

Luego de realizada la prueba de cobertura celular, se pretende realizar cálculos para familiarizarse con la utilización de modelos de propagación. Pero por sugerencia de la jefatura, se procede con una actividad más práctica y útil para la realización de los objetivos. Se trata de una prueba en terreno, utilizando una radio base UHF y una antena omnidireccional. Estos elementos fueron instalados sucesivamente en cada cámara de sectorización del emisario, con lo cual se puede comprobar la zona de cobertura que ofrecería una estación de radio instalada en cada una de estas cámaras.

Los elementos utilizados en las pruebas son:

- 1 radio móvil Kenwood TK880, de 25 W banda UHF y modulación FM.
- 1 antena omnidireccional de 7dB de ganancia, modelo Ringo Ranger II
- 15 m de cable coaxial Belden 3092A RG-6/U, con atenuación 4,01 dB/100ft (para las frecuencias utilizadas)
- 1 terminal portátil Motorola PRO7350, de 4W de potencia.

Estos equipos estaban todos disponibles en la planta, por lo que se consiguen rápidamente y sin costo. El esquema de conexiones es el que se muestra en la Ilustración 26.

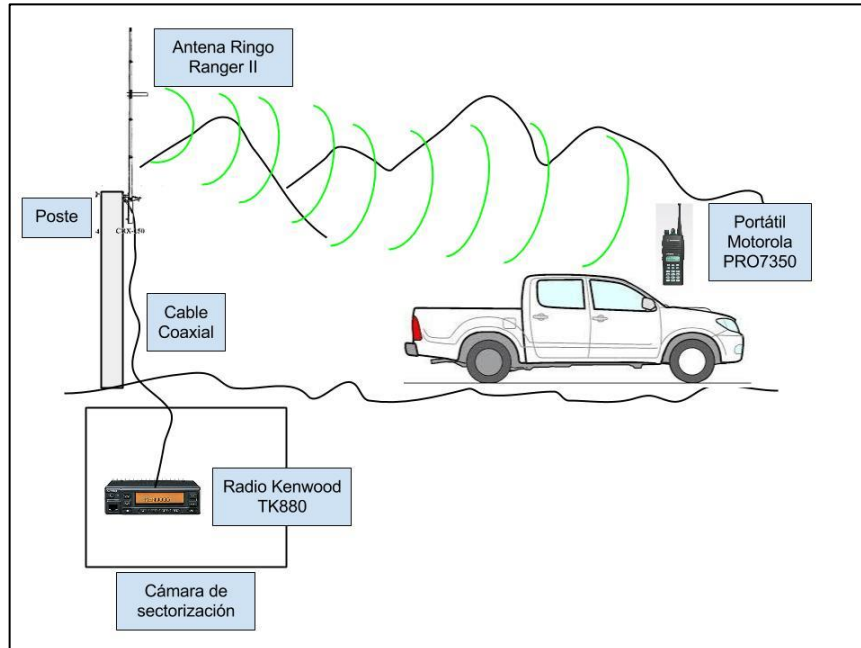
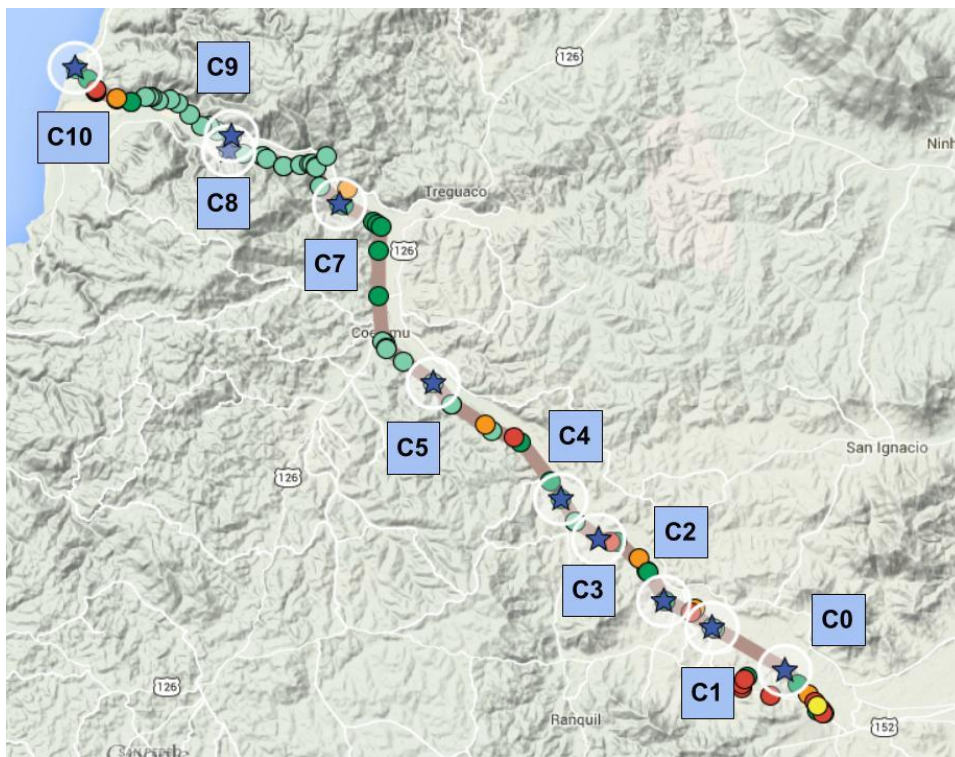


Ilustración 26 Montaje prueba de cobertura de radio

Se puede apreciar que se utiliza un poste para montar la antena. Este poste pertenece a la compañía y es utilizado sólo para sostener un tendido de cables de datos, por lo que la utilización de éste resulta segura, al no estar involucrados tendidos eléctricos de potencia. El poste tiene una altura de 10 m y en general se encuentra dentro de un radio de 2 m alrededor de las cámaras. La radio base es alimentada con el suministro disponible en cada cámara de sectorización y se instala al interior de éstas. Para conectar la radio con la antena, se utiliza para todos los casos un mismo cable coaxial de 15 m, para no alterar las condiciones de cada prueba.

La manera de realizar la prueba es bastante básica, se instala la antena y la radio base en una cámara de sectorización. Luego, un usuario al interior de la camioneta comienza a alejarse de la cámara y, utilizando un radio portátil, va constantemente intercambiando mensajes con un usuario en la estación base. Así se continúa hasta que la comunicación se pierde o la interferencia es demasiado grave. Sucesivamente se realiza el mismo procedimiento para cada una de las cámaras. Además, la posición GPS va siendo registrada utilizando un teléfono móvil con sistema Android y la aplicación My Tracks.

Anteriormente, en el desarrollo de esta memoria, se estableció en común acuerdo con la jefatura, que los puntos críticos para dar cobertura son las cámaras, donde se tiene acceso al ducto y por lo tanto donde realmente los equipos de inspección realizan las distintas operaciones. Éstas son las cámaras de sectorización, cámaras de ventosa y cámaras de puntos bajos. En función de eso es que se presentan los resultados de la prueba en la Ilustración 27.



*Ilustración 27 Resultado prueba de cobertura de radio*

Los círculos blancos con una estrella en el medio corresponden a las cámaras de sectorización, los círculos rojos corresponden a los sectores donde la señal se pierde o hay interferencia grave y los verdes son los sectores con buena cobertura. Se utilizan colores verde claro y oscuro sólo para diferenciar las zonas de cobertura de distintas cámaras.

Si bien se observan algunos puntos rojos, se comprueba que todas las cámaras de inspección contarían con cobertura. Hay que tomar en cuenta también que en el eventual caso de instalar estaciones base en cada cámara de sectorización, muchos de los sectores sin señal serían cubiertos por estaciones vecinas. El único sector donde el problema de cobertura es complicado, es en la zona alrededor de la cámara C0, pues un cerro se alza entre el lugar de la antena y algunas partes del camino, por lo que costaría bastante dar cobertura para esa zona, que es un trayecto de alrededor de 5 min, lo que no es tan relevante. Lo importante es que las cámaras cuenten con cobertura. Además, vale señalar que dada la cercanía entre las cámaras 8 y 9, para la prueba solo se realiza la instalación en la 8, en la cual se cuenta con un mástil más alto y, por lo tanto, más adecuado.

## 7.2 Análisis de datos y validación de modelo

Los datos obtenidos en terreno en la prueba de radio son contrastados con la predicción de cobertura entregada por un programa de modelación de radio enlaces. Dado que la comparación realizada resulta bastante exitosa entonces se asume que la herramienta utilizada cuenta con la validez suficiente como para servir de guía en el diseño de una solución.

Para la modelación de radioenlaces se busca varias alternativas de software y, siguiendo con la idea de utilizar solo los elementos existentes y evitar costos innecesarios, la búsqueda se reduce solamente a softwares gratuitos. Entre las alternativas finalmente se encuentra un software que destaca por sobre el resto, se trata del programa Radio Mobile. Las razones que justifican la elección de este software son las buenas referencias encontradas en foros especializados, así como el completo material alojado en la página oficial de los desarrolladores de este programa. Otro punto que indica la preponderancia de este software en el área de las telecomunicaciones son los cursos que la SUBTEL ofrece para enseñar su utilización. Se comprueba además que la anterior propuesta para solucionar el problema de telecomunicaciones, descrita en la sección 4.1.5, también utiliza este software en su desarrollo.

El programa Radio Mobile utiliza el modelo Longley-Rice, el cual es el modelo standard adoptado por la Federal Communications Commission (FCC) de Estados Unidos, y fue diseñado especialmente para la utilización de herramientas computacionales en cálculos de radioenlaces. Existen numerosos softwares que se basan en este método, de hecho, es el más ampliamente usado, lo que demuestra la validez de este mismo. Este modelo está diseñado para funcionar a frecuencias entre 20MHz y 20GHz, y para distancias entre 1 y 2000 km para realizar los cálculos se consideran las irregularidades del terreno, para esto el programa ocupa las bases de datos de elevación *Shuttle Radar Topography Mission* (SMTMP) con resolución 3 arco segundos (aproximadamente 90 m para cada celda de 1201x201), y además los siguientes parámetros:

- Constante dieléctrica de la tierra

- Conductividad de la tierra
- Constante Atmosférica
- Tipos de Clima
- Frecuencia
- Polarización Horizontal y Vertical
- Altura y diagrama de radiación de la antena

Además, considera la variabilidad del tiempo, lugar y situación. Esto último es una cifra estadística que representa el porcentaje de tiempo, lugares o situaciones en que se asegura que el valor entregado por el modelo es excedido.

El caso modelado, en principio, emula las condiciones de la prueba en terreno antes descrita, para poder comparar los resultados reales con los teóricos, y así comprobar la validez del modelo. Los parámetros utilizados entonces son:

- Altura de antenas base: 10 m (omnidireccional)
- Altura de antena móvil: 1,5 m (omnidireccional)
- Ganancia de antena base: 7 dBi
- Ganancia Antena móvil: 1,75 dBi
- Potencia de equipo radio base: 25 W
- Potencia equipo móvil: 4 W
- Sensibilidad equipo radio base: 0,28 uV
- Sensibilidad equipo móvil: 0,25 uV
- Frecuencia de emisión: 500 MHz
- La polarización es vertical

Las mediciones realizadas no son exactas y de hecho no se midió el nivel de señal, por no contar con los equipos, sólo se registraron los siguientes estados SS (sin señal), SIG (señal con interferencia grave), SI (señal con interferencia) y SB (señal buena). El registro fue hecho en forma manual y el tiempo o distancia entre mediciones no es constante, sólo se intenta mantener registro de los hitos importantes. Aun así, al revisar el contraste entre las mediciones y los resultados entregados por el modelo, se comprueba plena coherencia, como se aprecia en la Ilustración 28, en la cual se superponen los valores reales y teóricos para la cámara de sectorización C0, o también denominada CB (cámara de bifurcación), utilizando la herramienta Google Earth.

El área celeste indica la cobertura predicha por el programa. Para este caso, está determinada por el límite de nivel de señal 0,25 uV, que corresponde con la sensibilidad del terminal portátil utilizado en la prueba en terreno.



*Ilustración 28 Comparación resultados teóricos y reales CO.*

Se puede observar como al lado izquierdo existen unos puntos sin señal en el límite del área de cobertura predicha, y justamente un punto límite, con buena señal, dentro del perímetro coloreado. También, en la esquina inferior derecha los puntos señalados con cobertura, coinciden con pequeños manchones de color, y por encima de esta zona hay un punto naranja que se encuentra en el límite de cobertura. Todo muestra coherencia, el único problema es el punto SS en la parte central, que se encuentra al interior de la zona de cobertura.

Para estudiar más a fondo el problema del punto SS señalado en el párrafo anterior, se realiza un nuevo mapa que con distintos colores señala distintos rangos de señal. En la Ilustración 29 se puede observar este diagrama y notar como, efectivamente hay un cambio de nivel de señal en la zona cercana al punto, el cual tiene de etiqueta el número 3.

Además, salen indicados los puntos 1 y 2, que es donde comienza a escucharse en forma perfecta, se encuentran dentro del perímetro delimitado por nivel de señal  $10,225 \mu V$ , lo que se podría tomar como un perímetro de cobertura segura, pero se necesitarían más mediciones para poder comprobar esa hipótesis.

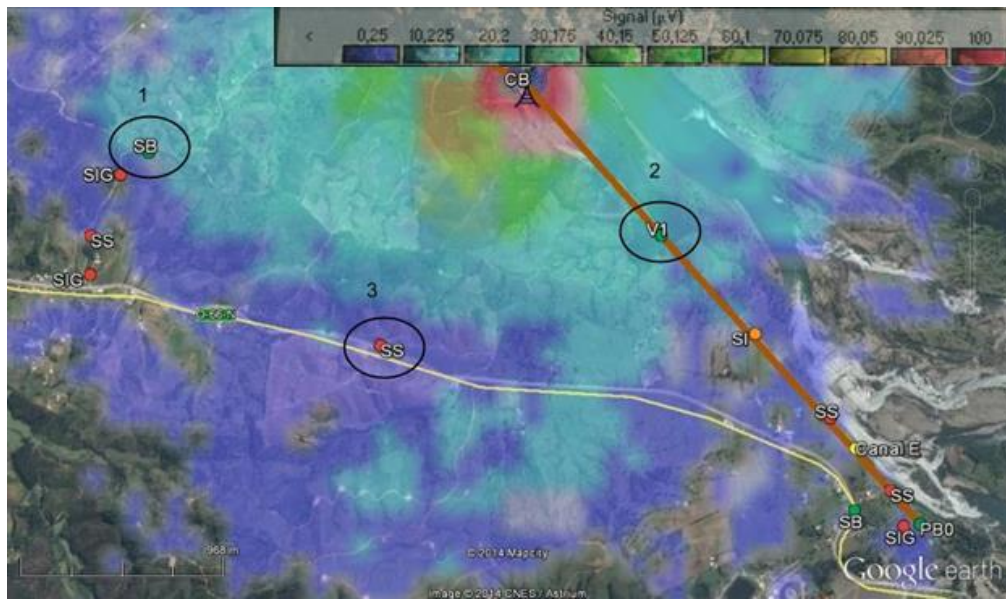


Ilustración 29 Diagrama de niveles de cobertura C0

En la Ilustración 30 se muestra el diagrama de rangos de nivel de señal para la estación C1, se puede observar como la cobertura predicha por el modelo es mucho mayor a la cobertura real obtenida, e incluso la zona celeste de 10,225  $\mu\text{V}$ , abarca mucho más terreno que lo que pasa en realidad. Pues para el recorrido realizado en la prueba, luego del punto naranja SI se perdía por completo la señal. Esto demuestra una falta de coherencia total, aunque una quizás esto está determinado por la existencia de un poblado, y por lo tanto, edificaciones en la zona.

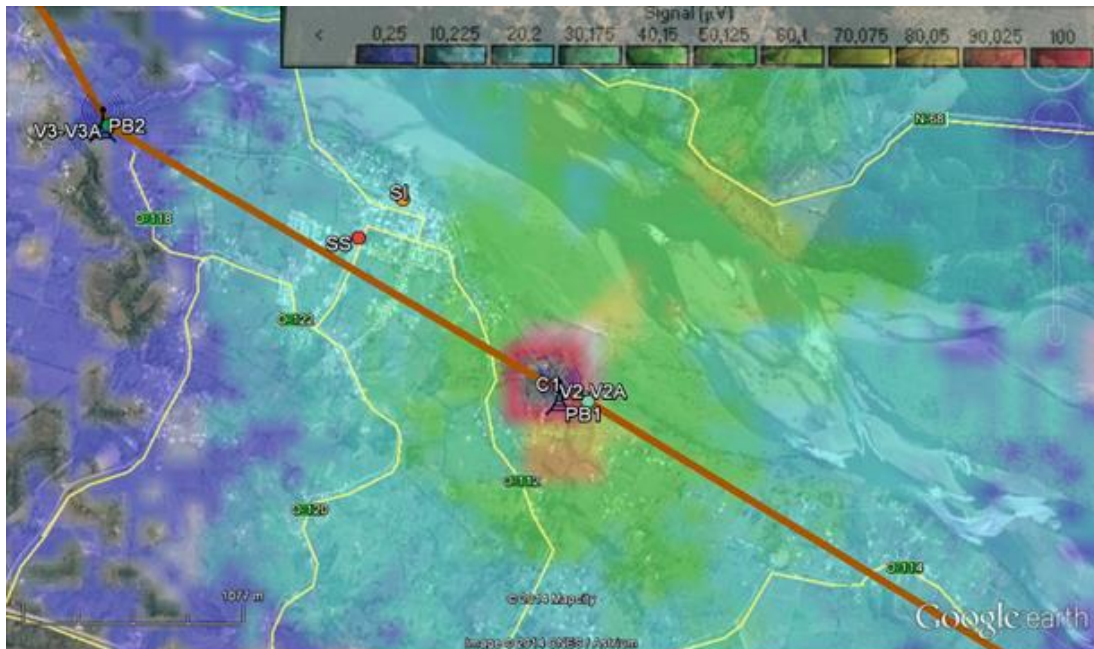


Ilustración 30 Niveles de señal C1

En la figura Ilustración 31 se muestran la comparación para la estación C2. Donde nuevamente se observa una coherencia entre los valores reales y teóricos. Con la pérdida de la señal en un lugar muy cercano al límite de zona coloreada.



Ilustración 31 Predicción C2

En la Ilustración 32 se muestran los resultados para la estación C4, donde también se observa la clara correspondencia, siendo el lugar de pérdida de señal el mismo señalado por el modelo.



Ilustración 32 Predicción C4

En la Ilustración 33 se muestra la cobertura para C7 y se logra comprobar como los puntos, donde comienzan los problemas de comunicación (puntos naranjos SI), corresponden con los límites de

la predicción. Aunque, por otro lado, se comprueba que la zona de cobertura es subestimada, pues el punto PB12 presenta buena señal pero se encuentra fuera de la zona azul.

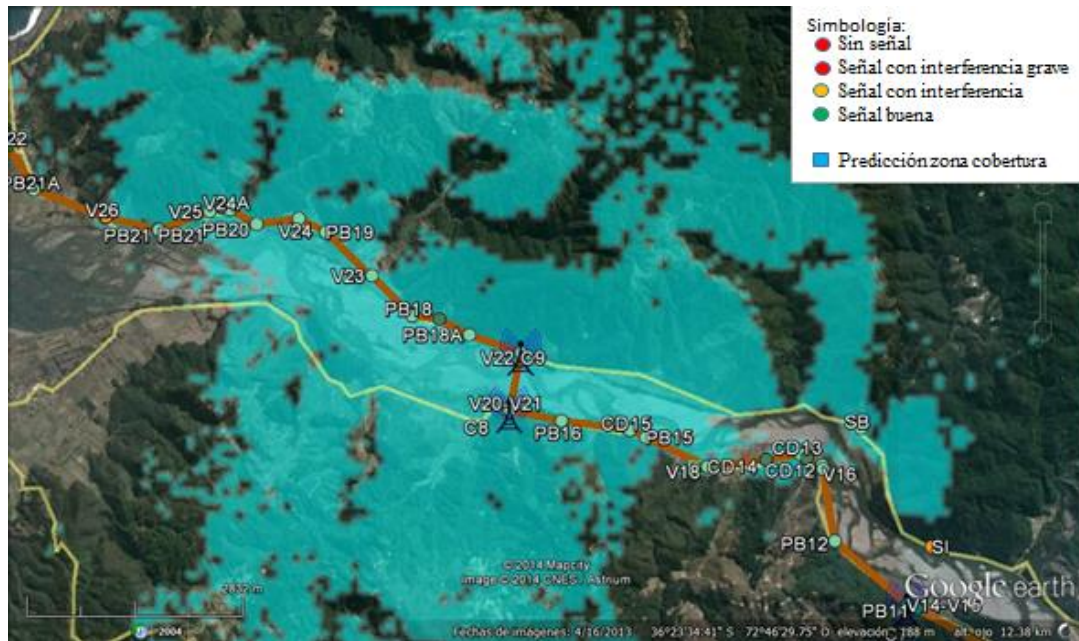


Ilustración 33 Predicción C7

Similar a la situación del punto PB12 para la estación C8, es la del punto PB9 y V11 para la estación C7, y para los puntos PB20, V25 y V24A de la estación C10 (CCM, cámara de descarga al mar). Lo similar de estas situaciones es que se tiene señal donde el programa predijo que no habría y el lugar es a la vuelta de un cerro, como se puede apreciar en la Ilustración 34.



Ilustración 34 Error en predicción C7 y CCM



Se nota claramente como es el barrido horizontal que realiza el programa, calculando rayos directos o difractados a través de un perfil vertical, pero no considera efectos de reflexión o de refracción no-vertical, que podrían en la realidad ampliar un poco el rango de cobertura en ciertos lugares de sombra, como es el caso de los puntos mostrados en la imagen anterior. Tomando en cuenta que la comparación entre resultados teóricos y prácticos es bastante positiva, salvo por el caso de la estación C1, se procede a obtener un mapa de cobertura general, el cual debiese ser una guía bastante confiable. El diagrama de cobertura se muestra en la Ilustración 35, utilizando colores azules y amarillos entre estaciones contiguas, para observar las zonas de traslape en verde.

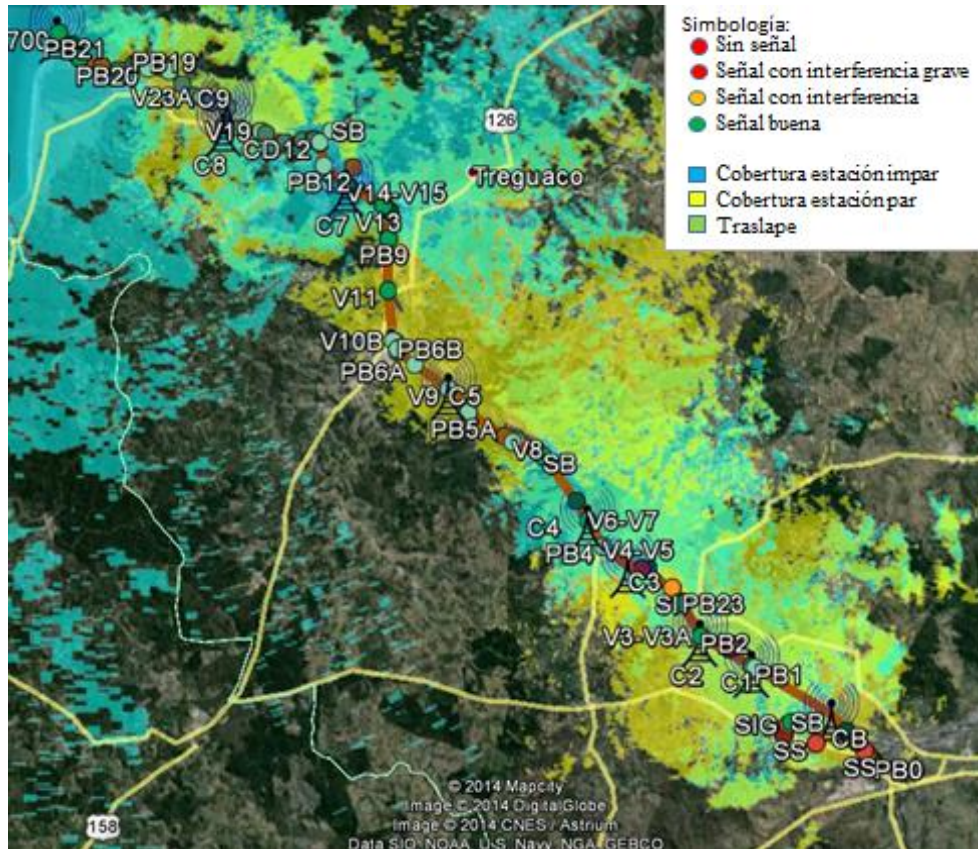


Ilustración 35 Predicción cobertura total

Se observa cómo se logra un 100% de cobertura teórica del trayecto del emisario, y la mayor parte de la zona cubierta presenta color verde, lo que significa que existen amplias zonas donde más de una estación podría entregar servicio. Es notable el traslape de zonas de cobertura entre las estaciones CB y C4, lo que hace pensar que quizás una o más estaciones podrían estar de más, y entonces se comienza a probar distintas disposiciones de estaciones base.

En la Ilustración 36 se muestra la cobertura de las estaciones CB (amarillo), C1 (Azul) y C2 (amarillos). Se puede apreciar como prácticamente toda la zona de cobertura de C1 está contenida dentro de la zona de cobertura de las otras dos, lo que indicaría que si se quitara esa estación del proyecto no debería alterar la zona de servicio total.

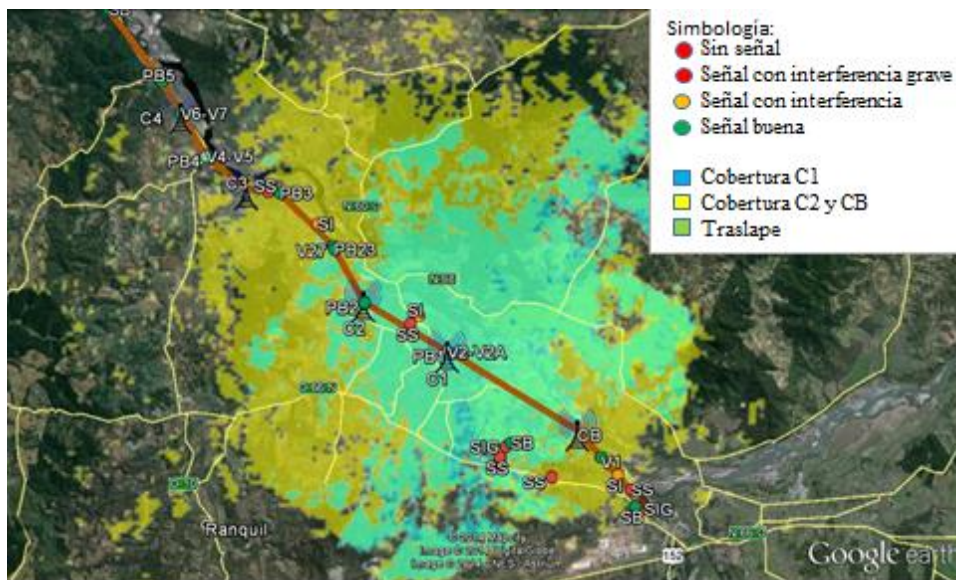


Ilustración 36 Cobertura C0-C1-C2

Lo mismo sucede para el caso de las estaciones C2, C3 y C4, donde la zona de cobertura de C3 se traslapa casi en su totalidad con el de las otras 2. Como se muestra en la Ilustración 37.

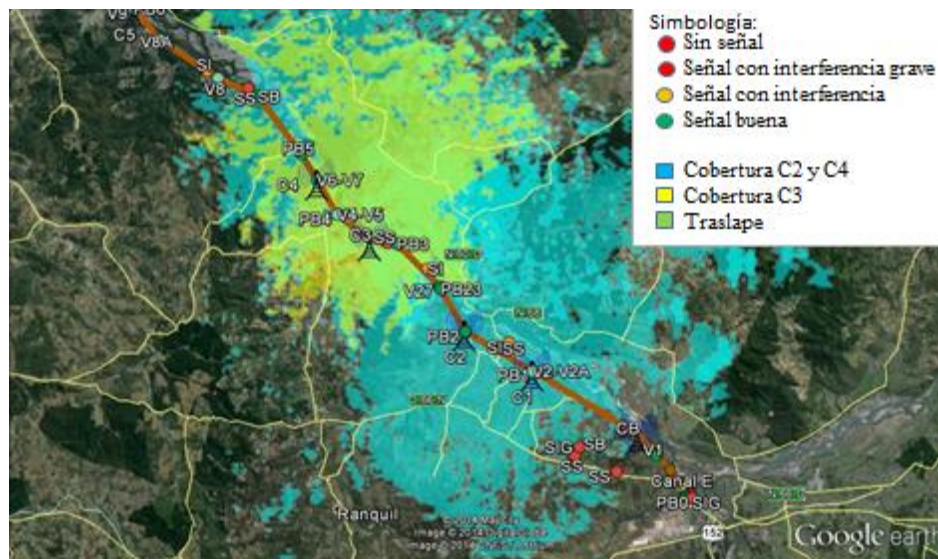


Ilustración 37 Cobertura C2-C3-C4

Otro punto donde la modelación permite complementar las pruebas de terreno es en una parte del camino donde se atraviesa el río. Pues para esta prueba se realiza el recorrido por una rivera, hasta la estación C8, luego con esta antena instalada se procede a retornar y cruzar el río, para luego seguir con el monitoreo de cobertura desde C9. Entonces una amplia zona de camino, no recibe cobertura desde C8 y no es posible testear el aporte que podría brindar C7 y C5. En la Ilustración 38 se muestra la zona de cobertura compuesta de C7 y C5, y se señala en rojo el segmento que no recibe cobertura de C8 en la prueba en terreno. El resultado entregado por el programa, permite

confiar en el hecho de que al estar instaladas las estaciones C5, C7 y C8 no debería haber puntos sin servicio en el camino que se utiliza para poder llegar a las últimas cámaras del emisario.

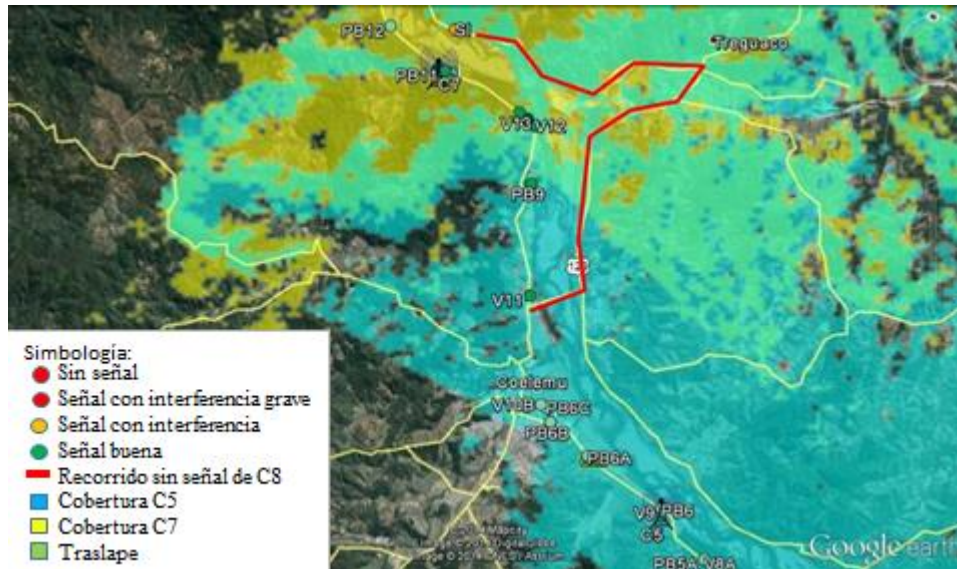


Ilustración 38 Cobertura C7-C5

### 7.3 Comparación de alternativas

Las variantes para resolver un problema de comunicación móvil pueden ser muchas, pero la base de la solución no escapa de lo que son las 3 tecnologías de comunicación móviles más utilizadas que son la red celular, diversas tecnologías de radio VHF o UHF, y telefonía satelital. A partir de este conjunto de soluciones bases es que se empieza a investigar y evaluar las distintas alternativas que puedan satisfacer las necesidades del proyecto en el que se trabaja.

Luego de la revisión del marco bibliográfico y los antecedentes se comprueba que la opción a utilizar para la interfaz de radio, es decir, para las comunicaciones entre dispositivos móviles y estaciones de radio fijas, es la utilización de la banda UHF asignadas para servicios limitados en los segmentos 459 - 460 MHz y 469 - 508 MHz. Después, queda resolver como comunicar estas estaciones fijas con la planta, donde las alternativas más atractivas son las que puedan hacer uso de la red de fibra óptica que recorre el emisario, pues es un recurso ya instalado, lo que obviamente resultaría en un descuento importante en los costos del proyecto. Cualquier otra solución cableada, evidentemente, no tendría chance de ser considerada, pues instalar un circuito nuevo en forma subterránea o aérea significaría mayor tiempo de implementación y un aumento importante en el costo de la solución.

La fibra óptica de la red de datos del emisario, se encuentra conectada a numerosos switch que se encargan de realizar la adecuación de medios físicos y conforman una red IP entre las estaciones

o cámaras de sectorización. Dado que esta red tiene gran capacidad (100Mbps) en comparación con los datos traficados, y que los switch instalados aún tienen bocas desocupadas, se torna obvio que cualquier solución cableada debería utilizar la fibra óptica, a través de conexión a los switch disponibles y, por lo tanto, a través de una red IP. Entonces, se procede a estudiar las opciones que permitirían comunicar estaciones de radio UHF a través de una red IP.

Al realizar una búsqueda en internet se encuentra que la tecnología requerida para llevar a cabo una solución como la descrita en el párrafo anterior es la denominada RoIP. Que es una nueva tecnología sin estandarización muy desarrollada pero que si se pueden hallar algunas alternativas comerciales. Las alternativas se pueden dividir en dos tipos, los repetidores de radio con capacidad de comunicación mediante IP y los dispositivos que permiten transformar la señal de salida de un equipo de radio tradicional a IP.

Los repetidores con capacidad de intercomunicación mediante IP que se pueden encontrar en el mercado, son los desarrollos de 3 marcas:

- Motorola: con su nueva línea de equipos MOTOTRBO y su solución IP Site Connect.
- ICOM: Con su línea de equipos IDAS.
- Kenwood: Con su línea de equipos NEXTEDGE.

La arquitectura utilizada es bastante simple, los repetidores funcionan al igual que los repetidores convencionales, como los equipos en la red de radio de la planta, con modulación análoga o digital, pero tienen puertos Ethernet que permiten comunicar entre estos repetidores, a través de una red IP. Todas las alternativas permiten la opción de funcionar con sistemas trunking, y así administrar gran número de canales de radio, lo cual es apto para redes con muchos suscriptores y grupos de conversación, pero no para comunicar solo un par de terminales como es el caso de este proyecto. Entonces la opción de sistemas trunking sería una solución sobredimensionada.

Los protocolos que utilizan estos equipos son propietarios, por lo tanto, no hay suficiente información acerca de cómo funcionan, de lo que si hay información es de cómo se utilizan en la práctica. A continuación, se revisan algunos de estos sistemas.

### 7.3.1 Motorola IP Site Connect

La característica más notable de este sistema es su capacidad de funcionar con TDMA, Time Division Multiple Access, lo que permite doblar la capacidad de un canal de 12,5 kHz, mediante 2 time slots que pueden establecer 2 llamadas dentro del mismo canal. Según el folleto de Motorola la utilización de TDMA tiene un mejor desempeño, que FDMA de ancho de canal 6,25 kHz, que sería como la tecnología equivalente, al doblar la capacidad de un canal de 12,5 kHz. Permite intercomunicar hasta 15 equipos repetidores mediante red IP.

Los repetidores que son compatibles con esta tecnología son los modelos:

- DGR6175 (Mediante compra de licencia adicional)
- XPR8400
- MTR3000

### 7.3.2 Kenwood NEXTEEDGE

Se utiliza el vocoder AMBER+2 para digitalizar la voz, FEC (Forward Error Correction) para corrección de errores y una modulación FSK de 4 niveles, lo que según sus folletos informativos permitiría mejorar en un 20% la cobertura, en comparación con sistemas análogos. Además, la calidad de audio tendría mucha mejor calidad para zonas con señal débil, como se muestra en la Ilustración 39.

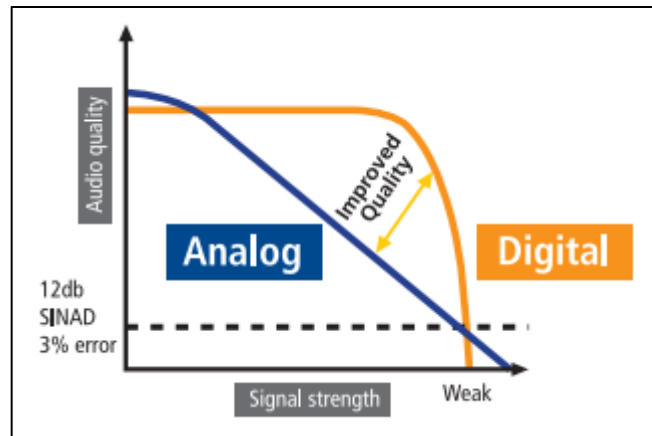


Ilustración 39 Comparación desempeño digital-análogo

El sistema admite trabajar con ancho de canal de 12,5 kHz o 6,25 kHz lo que permite duplicar la capacidad de un canal de 12,5 kHz, que es la canalización indicada por la regulación chilena.

En cuanto a la seguridad de las comunicaciones ofrece scrambling digital de 15 bits, para la comunicación aérea, y VPN tunneling para los enlaces IP. Además, posee sistema de validación para los equipos que quieran conectarse a la red, luego un equipo no registrado no puede emitir mensajes.

Se pueden conectar hasta 16 sitios mediante unicast y 48 sitios mediante multicast. Además, el sistema soporta el intercambio de beacon signals (señales de faro) con el terminal, lo que permite que el terminal pueda funcionar en modo de roaming automático, y elegir el sitio con mejor señal para realizar una llamada.

Otra notable característica es la integración de un sistema de voting, lo que quiere decir que los repetidores, aparte de enviar y recibir la señal de voz mediante la red IP, también envían el nivel de señal en el terminal, entonces los repetidores pueden seleccionar automáticamente la mejor opción. Esta opción solo viene incluida en los modelos NXR 710/810, pero para que este repetidor se conecte a IP, se necesita de un módulo adicional KTI-3. Esta forma de operar se muestra en la Ilustración 40. Adicionalmente se cuenta con software de monitoreo de la red, programación por radio, programación por IP y gateways que permiten comunicarse con redes públicas de telefonía.

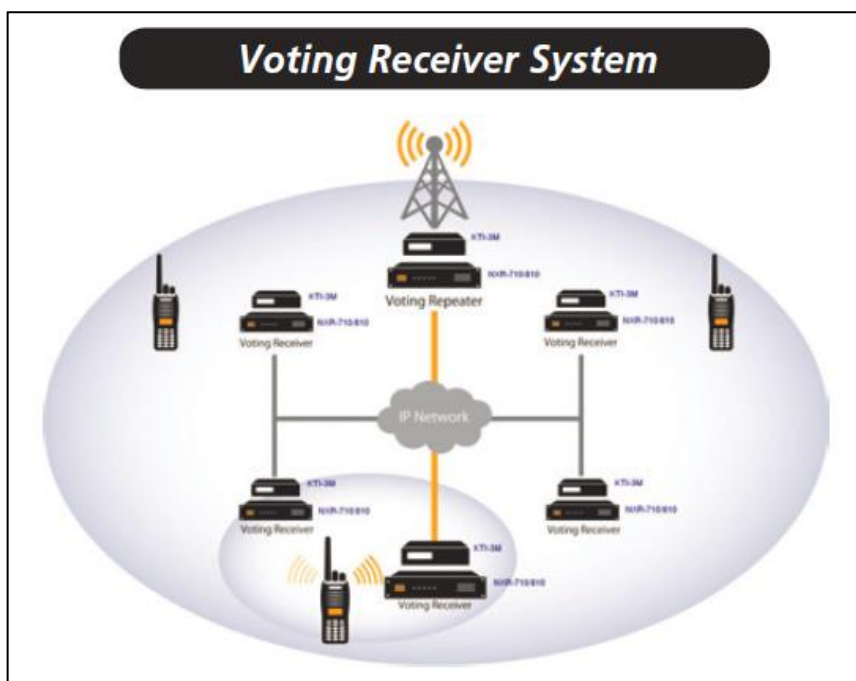


Ilustración 40 Sistema multi-sitio convencional de Kenwood NEXTEDGE con Voting

Los repetidores de esta línea son los modelos:

- NXR -700/800/900
- NXR-710/810 (debe utilizarse módulo adicional KTI-3)

El número del modelo depende de la banda que utilice, en este caso 7XX significa VHF, 8XX UHF y 900, corresponde a la banda de los 900MHz.

### 7.3.3 Icom IDAS

Como se puede leer en los folletos informativos de Kenwood y de ICOM, la tecnología NEXTEDGE, fue desarrollada en conjunto por estas 2 compañías, por lo tanto las características son muy similares, de hecho son las mismas, salvo que IDAS puede funcionar sobre protocolo NEXTEDGE o ETSI dPMR. IDAS también tiene capacidad de utilizar canal de 6,25 kHz, vocoder AMBER+2, modulación FDMA, scrambling de voz de 15 bits e identificación de terminales. La única diferencia es que para la conexión IP de multi-sitios convencionales existe un máximo de 16 repetidores. Una característica mostrada en el folleto de la tecnología, y que llama la atención, es el llamado Vote Scan, esta es unas características de las radios portátiles y móviles de la línea que permite a estos dispositivos reconocer cuál es la señal más fuerte entre las provenientes de varios repetidores.

El modelo de repetidor compatible con la comunicación IP es el IC-FR6000(UHF), pero para conectarse con múltiples sitios necesita la instalación del módulo de instalación UC-FR5000 y el programa CF-FR5000MC. En la Ilustración 41 se muestra la forma de conectar una red de repetidoras mediante IP, en la configuración básica que en los folletos de ICOM se señala como IDAS convencional con conexión IP. Que sería la solución adecuada para el caso estudiado, donde el número de terminales y el tráfico son bajos.

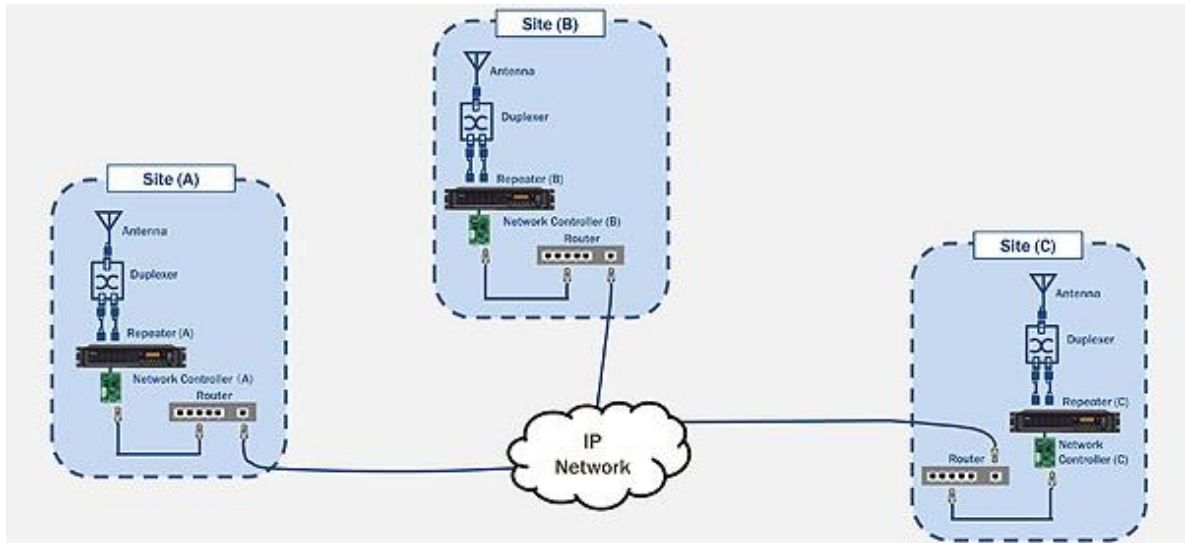


Ilustración 41 Repetidoras ICOM conectadas mediante red IP

### 7.3.4 Convertidores RoIP

Otra alternativa similar a las anteriores, pero más barata y más simple, es la utilización de convertidores RoIP, o más precisamente, Gateways RoIP. Estos aparatos permiten convertir el audio a la salida de una estación base a paquetes IP y rutearlos hasta otro Gateway RoIP, que se conecta a la entrada de audio de otro equipo remoto. Así se forma un puente IP que permite conectar dos equipos de radio. En la Ilustración 42 se muestra como algunos equipos portátiles conectados con distintas radios bases logran comunicación a través de IP.

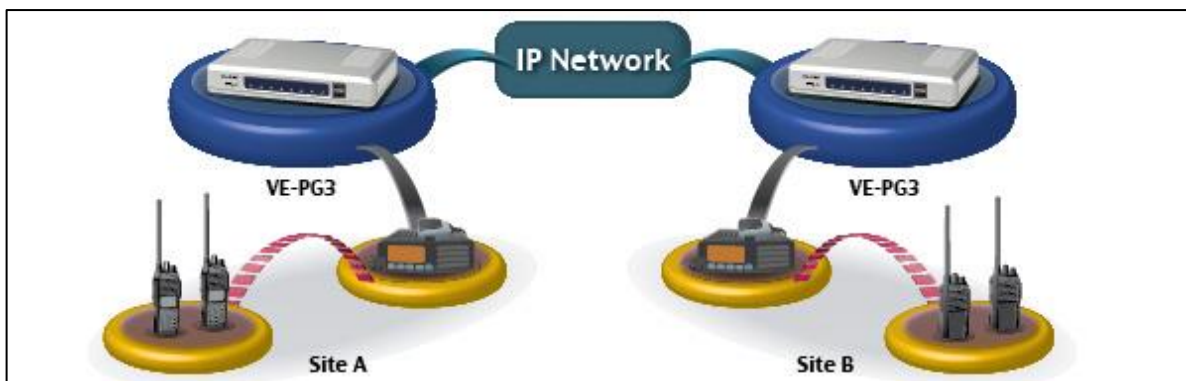


Ilustración 42 Puente IP con equipo ICOM VE-PG3

Al buscar las alternativas comerciales para esta solución, se encuentran varias marcas que ofrecen equipos de estas características, pero la única que tiene representante en Chile es la marca ICOM, las demás alternativas ni siquiera figuran entre los catálogos de las tiendas de radiocomunicaciones locales. Sin embargo, aún se buscan los precios de estos otros equipos y se encuentra que no existen grandes diferencias. Luego la existencia de un proveedor local inclina la balanza por la marca ICOM con su modelo VE-PG3.

### 7.3.5 Selección de solución

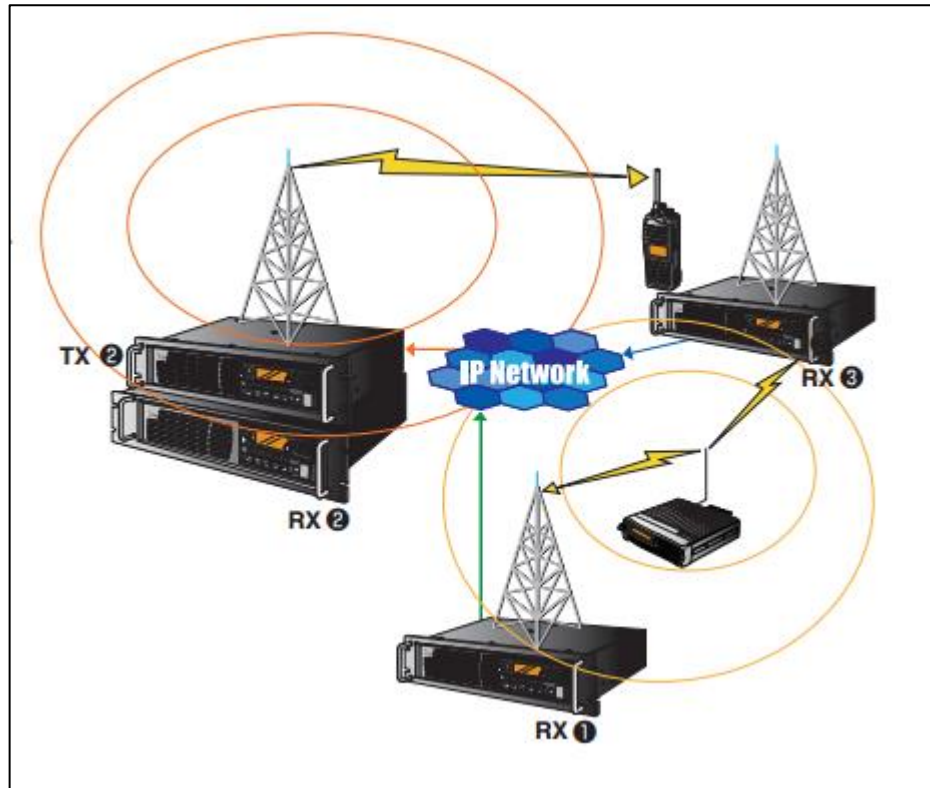
Como se pudo apreciar en la sección anterior, el abanico de posibilidades para dar solución a la problemática de esta memoria no es muy amplio. En resumen, se reduce a solo 2 opciones, que son:

- Radio sobre IP, utilizando equipos repetidores con conexión IP.
- Radio sobre IP, utilizando equipos conversores de audio a IP.

Entre las soluciones de RoIP la principal diferencia es el precio. Los sistemas repetidores funcionan en modo Full Duplex, por lo tanto, exigen la utilización en forma simultánea de dos frecuencias distintas para los enlaces de transmisión y recepción. Para que esto funcione sin problemas se necesita utilizar dos antenas a distintas alturas o un duplexor, que permite realizar la transmisión y recepción con una misma antena. Dada la baja altura de los postes a utilizar, resulta impracticable la utilización de 2 antenas (a no ser que se realicen postes nuevos más altos), por lo tanto, no habría otra alternativa que la utilización de un duplexor, que para banda UHF tienen un elevado precio, cercano a \$1.500.000 pesos. A esto se suma el costo del repetidor, que al revisar las opciones en el mercado nacional no se logra encontrar opciones más económicas que \$1.300.000 para un repetidor Motorola, a lo que se debe agregar el precio de una licencia adicional para lograr conexión IP, el precio de la cual no logró ser averiguado, pues los distintos proveedores nunca respondieron a esa solicitud. Bueno, igualmente se tendría que el precio del repetidor más duplexor es del orden de los \$3.000.000 lo que prácticamente dobla el precio de un conversor IP Icom (VE-PG3) más Radio base Kenwood UHF, que no supera el valor de \$1.500.000.

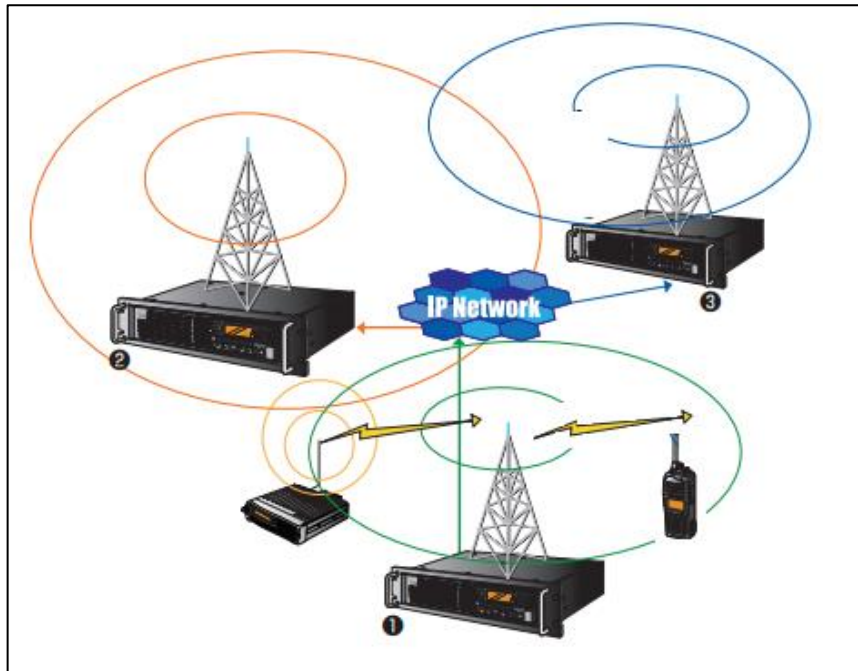
Vale señalar que, si bien los sistemas repetidores presentan varias ventajas, como la capacidad de funcionar como sistema trunking, la identificación equipos, que impide a equipos externos interactuar con el sistema, y el poder comunicar cientos de terminales. Todas estas ventajas no son útiles para la situación estudiada, donde sólo se necesita comunicar un par de terminales entre planta y el equipo de inspección del emisario. Una ventaja útil del sistema de repetidores sería la capacidad de estos de realizar “voting”. Esto significa que cada equipo de radio podría discriminar la señal más potente entre varias señales recibidas (recibidas desde la red IP que conecta las estaciones), lo cual permitiría que la frecuencia de recepción de las estaciones sea la misma y que un terminal pueda transmitir desde zonas con traslape de cobertura sin problemas de interferencia. Por lo tanto, el terminal podría moverse sin problema a través de las distintas estaciones. En la Ilustración 43 se muestra el funcionamiento del sistema “voting”, donde las estaciones 1 y 3 reciben el mensaje desde la radio móvil y luego retransmiten hacia la estación 2 mediante red IP. Entonces, la estación 2 selecciona sólo la señal más potente entre las recibidas desde las estaciones 1 y 3, y transmite esta señal por aire hacia la radio portátil.





*Ilustración 43 Sistema voting*

Otra ventaja útil de las estaciones repetidoras sería la capacidad de las repetidoras de intercomunicar 2 terminales conectados a la misma estación, pues todo mensaje recibido es retransmitido simultáneamente por aire además de ser transmitido mediante IP. Entonces dos terminales podrían comunicarse desde estaciones distintas a través de la red IP, o conectados a la misma estación vía radiofrecuencia. Esto último se explica en forma gráfica en la Ilustración 44. Donde una radio móvil se comunica con una radio portátil dentro de la zona de cobertura de una estación



*Ilustración 44 Comunicación de dos móviles en la misma estación*

A favor de la solución con conversor RoIP, se logra encontrar la existencia de otro modo de voting, uno realizado por el equipo móvil, el cual escanea distintos canales en búsqueda del mejor, y entonces transmite por ese canal. Por lo que, si se asigna distintos canales de frecuencia para estaciones contiguas, y estos canales son ingresados a la lista de escaneo voting del terminal, el resultado sería equivalente al voting realizado por el sistema de repetidoras. Por otro lado, la comunicación dentro de la zona de cobertura de una estación es una ventaja que podría ser útil en alguna situación especial, pero normalmente la única comunicación a establecer sería entre el equipo de inspección en el emisario, y una estación en planta, que es la razón principal del proyecto. Además, en caso de necesitarse comunicación entre terminales dentro de una misma zona de cobertura, podría asignarse una frecuencia exclusiva para comunicación directa entre estaciones móviles, lo que entregaría distancias de conectividad muy reducidas pero que igualmente podrían resultar útiles.

Otro factor a considerar, es la existencia de un proyecto de telecomunicaciones presentado por la empresa Esmeralda SA, en el 2010 (señalado en la sección de Antecedentes). Este proyecto no permitía ni siquiera la comunicación entre terminales conectados a distintas estaciones a través del emisario, sólo permitía comunicación entre una estación en el emisario y una estación en planta. El proyecto fue aceptado por sus características técnicas, pero rechazado por su coste, de \$30.000.000. Entonces, se corrobora que el principal objetivo es sólo conectar al equipo de inspección del emisario con la planta, y el otro factor crítico, sería lograr un coste de proyecto mucho menor a los \$30.000.000.

Dado que la alternativa de utilización de estaciones repetidoras no permitiría bajar significativamente los costos con respecto del anterior proyecto rechazado, se decide descartarla. En su lugar, se decide en favor de una alternativa con un coste de implementación prácticamente 50% menor, con características más básicas, pero que permitiría comunicar de igual forma y con

la misma zona de cobertura, una estación portátil o móvil, que recorra el emisario (con el equipo de inspección), y el personal en planta.

Finalmente, la solución seleccionada luego de una reunión con la gente del área de electro control, que es al área a cargo del proyecto, es la solución de RoIP con convertidores. Por ser una solución que se considera, cumple con los requerimientos establecidos y tiene mayor probabilidad de ser aprobado para su ejecución por parte de las áreas de gerencia de ingeniería.

El área de cobertura esperada es la misma señalada en la sección de Modelamiento de Radioenlaces, pues para la solución planteada se planea utilizar equipos de las mismas características de los utilizados en las pruebas de radio realizadas (sección Pruebas de Radio), que resultan ser las mismas características utilizadas en la modelación de los radioenlaces. La coherencia entre los resultados teóricos y prácticos, corroborada en la sección de Modelamiento de Radioenlaces, permite confiar en la cobertura de la red a desarrollar.

#### 7.4 Seguridad en la comunicación y respaldo energético

Existen dos requerimientos para los cuales hubo que realizar una investigación aparte para encontrar la forma de satisfacerlos. Estos requerimientos son:

- Contar con un sistema de seguridad, que permita privacidad en las comunicaciones.
- Contar con un sistema de respaldo energético.

Para resolver el problema de privacidad, se revisan los folletos de varios equipos de radio y entonces se haya el llamado “scrambling” de voz, que se podría traducir como el cifrado de voz o encriptación. Este cifrado de voz, es una característica integrada en gran cantidad de equipos (también puede ser una característica opcional), que produce cierta alteración en el mensaje de voz transmitido, que en caso de ser recibido por un equipo funcionando en modo convencional, de modulación FM por ejemplo, se torna incomprensible. Todas las marcas tienen sus propios métodos de cifrado que van desde los niveles más simples, que permiten 16 formas distintas de encriptación, hasta niveles que permiten miles de formas de encriptación. Luego, para que un intruso pueda escuchar los mensajes transmitidos debe, además de localizar la frecuencia del canal utilizado, encontrar el código de cifrado utilizado. Para esto debería escanear entre miles de canales UHF y justamente pasar por el canal que se quiere resguardar, cuando se produce una transmisión, entonces proceder a ubicar el código de encriptación justo, para la marca de equipos y el nivel de cifrado correspondiente por medio de prueba y error. A eso habría que sumar que el intruso debería tener los conocimientos necesarios para identificar que el mensaje ilegible corresponde con un canal encriptado, que no es una característica muy común entre los receptores disponibles en el mercado. Todo lo anterior permitiría concluir que la posibilidad de transgredir la seguridad del sistema sería muy baja.

El método anterior permitiría evitar escuchas por parte de equipos externos a la red pero también debe buscarse una forma de evitar que alguien pueda emitir mensajes indeseados por los canales utilizados. Para esto, la solución más adecuada sería contar con elementos de identificación y registro de equipos autorizados, pero esto sólo sería posible con la utilización de sistemas trunking o estaciones repetidoras, más complejas que las simples estaciones de radio base que se planea

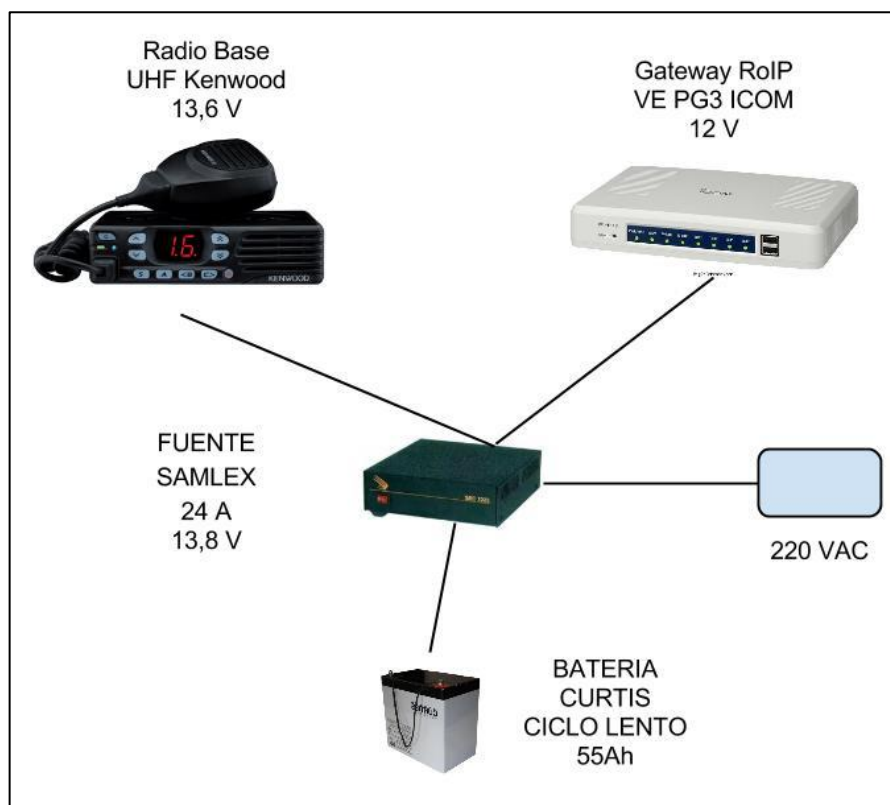
utilizar en el montaje de la red. Entonces, se logra encontrar una solución más básica pero que permitiría un importante nivel de seguridad, y esto es la utilización de códigos o tonos de silenciamiento (Squelch tone).

Los tonos de silenciamiento son tonos subaudibles que se transmiten junto con el mensaje de voz, que permiten definir distintos grupos de conversación en un mismo canal de radio. Al transmitirse un mensaje junto a un tono de silenciamiento, asociado a un grupo de conversación, sólo los equipos pertenecientes a ese mismo grupo escuchan el mensaje. Todos los equipos sintonizados en el mismo canal de radio reciben el mensaje pero el tono de silenciamiento sólo activa las salidas de audio de los equipos del grupo de conversación. Entonces, en la práctica resultan ser canales de comunicación independientes. El objetivo de esto no es exactamente la seguridad pero resultaría una buena opción para cuidarse de emisiones indeseadas. Sólo bastaría con asignar un mismo tono o código de silenciamiento a todos los equipos de la red.

Para la marca de radios Kenwood, por ejemplo, el protocolo propietario es denominado QT/DQT y permite utilizar 125 posibles tonos o códigos, lo que obligaría a un posible intruso a tener que probar entre 125 posibilidades para lograr emitir un mensaje hacia el sistema. Además, el intruso no tendría forma de saber si está siendo escuchado, pues al estar activado el sistema de scrambling los mensajes para uno u otro lado no podrían ser descifrados.

Para el problema de respaldo energético la solución es bastante simple y es la utilización de una fuente de voltaje DC con respaldo de baterías. Estos equipos funcionan como cargador de baterías y fuente de voltaje mientras el voltaje de entrada se mantiene dentro de los rangos aceptables. Pero cuando se sobrepasan esos valores se cambia al modo de alimentación desde la batería. Luego, además de actuar como un sistema de respaldo, también actúa como sistema de protección ante cualquier inestabilidad en el suministro eléctrico.

Las fuentes de voltaje con respaldo de baterías en general entregan voltajes DC de 13,8 V nominalmente, el problema es que se debería respaldar un radio base con voltaje de operación 13,6 V (generalmente) y un gateway RoIP ICOM con voltaje de operación 12 V. Pero al consultar a un proveedor, representante de la marca ICOM, se confirma que con voltajes de 13,8 V no habría ningún problema y que, de hecho, la utilización de este tipo de fuentes de poder es muy común. En la Ilustración 45 se muestra un esquema de las conexiones de alimentación que se planea realizar en cada estación.



*Ilustración 45 Sistema de respaldo energético*

En el esquema anterior se muestra la utilización de una fuente marca Samlex, que son de común uso y se encuentran en todos los catálogos de proveedores de radiocomunicaciones. Además, se muestra una batería de ciclo lento marca Curtis, también populares entre los catálogos de proveedores. La capacidad de la batería depende solamente de cuanto se esté dispuesto a pagar. Dependiendo del precio se puede encontrar baterías de esta misma marca, desde 1,3Ah hasta 250 Ah. En este caso se considera una batería de 55 Ah que según los cálculos realizados permitiría una autonomía de la estación de radio de 26 horas, con un costo cercano a los \$80.000 pesos. Con una batería de 250 Ah se lograría una autonomía de 118 horas, pero el costo de la batería asciende a los \$290.000. Un tiempo de autonomía mayor a 80 horas sería inútil, pues ese es el tiempo de autonomía del sistema que abastece a los switches, por lo tanto, luego de las 80 horas se pierde la conectividad con la fibra óptica.

Otra alternativa, para respaldar la alimentación de la estación de radio sería la conexión al cargador de baterías instalado en cada cámara de alimentación, utilizando un convertor de 24 Vcc a 12Vcc. Pero eso implicaría alterar las rutinas de carga del banco de baterías y por lo tanto cambiar el programa cargado en el sistema de control distribuido (DCS). Asimismo, dado que el consumo de la estación se estima en 2,1 A y el consumo de todo el sistema de instrumentación se estima en 2,5 A, entonces se podría concluir que la autonomía quedaría reducida a la mitad. Finalmente, se concluye que no sería correcto cambiar las condiciones para las cuales fue diseñado originalmente el sistema de respaldo,

## 7.5 Arquitectura de la solución

La arquitectura de la solución planteada se puede resumir en el esquema mostrado en la Ilustración 46. Ese esquema muestra las conexiones que se deberían realizar entre 2 estaciones consecutivas, pero el mismo esquema se utilizaría para montar la red a través de todo el emisorio. El canal aéreo a utilizar será análogo FM y modo SIMPLEX, sobre frecuencias para las cuales se debe obtener permiso y, dado que no es posible saber que frecuencias están disponibles, sólo se considera 2 frecuencias cercanas a los 500 MHz de la banda UHF habilitada para servicios limitados de comunicaciones. La alternativa digital no ofrece ninguna ventaja relevante y los costos de los equipos son mucho más altos. Además, las pruebas en terreno fueron realizadas con equipos análogos, así que ya se conoce su efectividad. Se consideran 2 frecuencias diferentes para estaciones contiguas, para evitar el traslape de zonas de cobertura y que una señal sea recibida por dos estaciones a la vez, pues en ese caso las señales transmitidas mediante la fibra óptica se interferirían entre sí. En este diagrama también se incluye la conexión de elementos para el respaldo energético, cuyo funcionamiento ya fue explicado en la sección anterior.

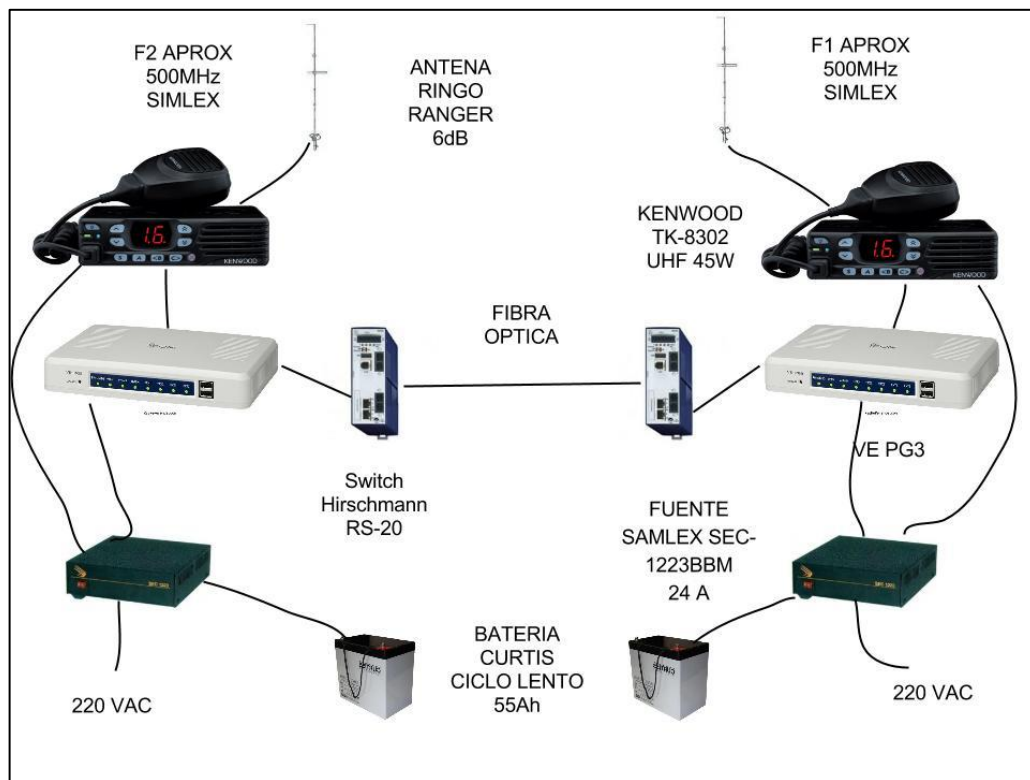
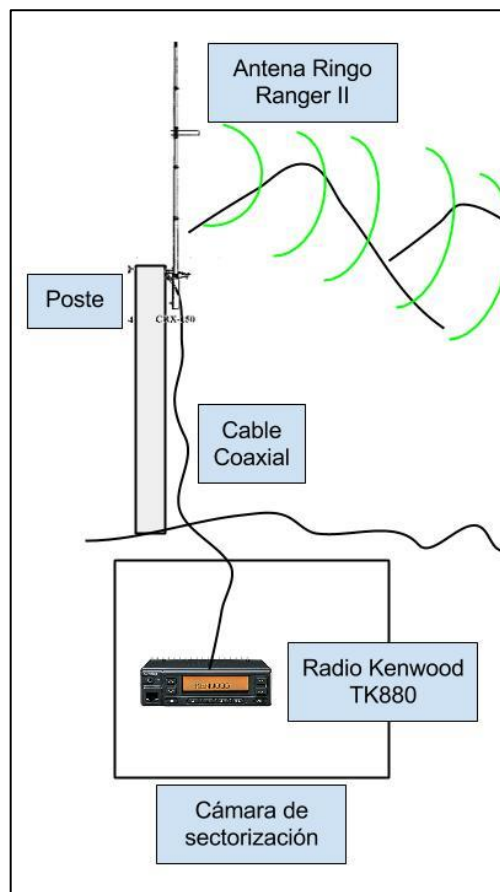


Ilustración 46 Diagrama de conexiones solución final

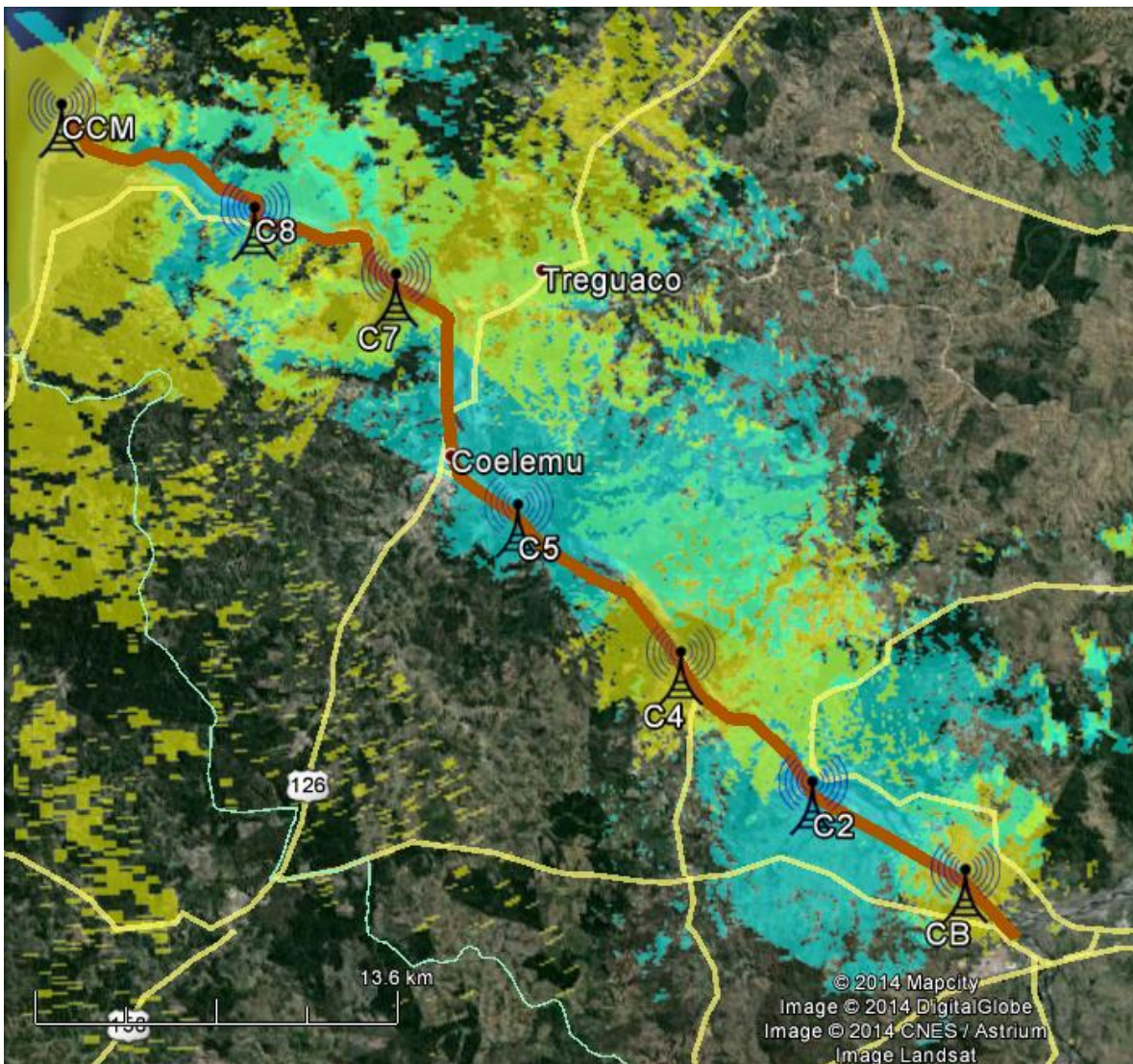
La antena mostrada en la figura debe estar instalada en un poste ubicado al costado de cada cámara, como se muestra en la Ilustración 47. Este poste sólo sostiene cables de datos, no de suministro eléctrico, por lo que la instalación es segura y no existe la posibilidad de interferencias. Estos postes pertenecen a la empresa y no habría problemas con utilizarlos.



*Ilustración 47 Instalación de antena*

Como se demostró en la sección de análisis de datos, la herramienta computacional utilizada tiene validez y serviría como guía para el diseño de la red. La cobertura conjunta predicha por el programa, para el caso de instalar una estación de radio en cada cámara de sectorización, resulta satisfacer plenamente las expectativas. Más aún, se advierte que incluso quitando 2 estaciones, que serían las estaciones para las cámaras de sectorización 1 y 3, se conseguiría un área de cobertura prácticamente igual. Se asume válida la reducción de número de estaciones, y se considera este hecho una forma de optimización de la solución, posible gracias a la utilización de herramientas de modelación.

En la Ilustración 48 se muestra entonces la cobertura esperada para el diseño de red definitivo. Se utilizan dos colores distintos para distinguir las áreas de cobertura de estaciones de radios contiguas. Se puede apreciar cómo se cubre toda la extensión del trazado del emisario, en café, y como las áreas de traslape entre estaciones con la misma frecuencia de transmisión, son mínimos.



*Ilustración 48 Cobertura conjunta estimada para diseño definitivo*

Para lograr moverse entre las estaciones sin perder conectividad se encuentra una solución muy económica, que es el escaneo automático de canales, disponible incluso en los equipos portátiles más básicos. Esta característica permite detectar cualquier mensaje entrante por cualquiera de los canales en la lista de escaneo. Luego, se puede programar un tiempo dentro del cual se responde a través del mismo canal por donde se recibió el mensaje anterior. Eso permite que los mensajes enviados desde planta vayan marcando el canal de frecuencia por el cual se desarrolla la conversación.

Hasta el momento se han considerado los enlaces aéreos, pero no se han considerado los enlaces en la red IP. Para lograr la conectividad mediante la fibra óptica sólo se debe definir la dirección IP de cada conversor RoIP en un segmento adecuado para los switch en cada cámara de sectorización y conectar los equipos RoIP mediante un cable Ethernet a una de las bocas disponibles en el switch. Luego, como los equipos RoIP vienen programados con una misma dirección de multicast y la red de switches tiene habilitada la opción de multicast, entonces



automáticamente todos deberían ser integrados al mismo grupo de multicast. Así los mensajes de voz recibidos por una estación de radio, son dirigidos inmediatamente a todas las demás estaciones.

Para completar el circuito de comunicación debe instalarse una última estación en el sector de planta de efluentes del CFI Nueva Aldea, que es donde está el personal que debiese mantener comunicación con el equipo de inspección del emisario. Las radios portátiles del personal en planta de efluentes que necesiten comunicarse con el emisario, deben ser reprogramadas para agregar un nuevo canal. Este canal permitiría comunicarse con la estación de radio RoIP instalada en planta, y por medio de la red de fibra óptica, comunicarse con toda la extensión del emisario. Esta última estación también puede ser configurada para conectarse con el sistema trunking, o cualquier otro canal de radio, pues el sistema RoIP, funciona independientemente del canal en que transmite o recibe la radio base. En total el diseño considera la instalación de 8 estaciones de radio.

## 7.6 Análisis de costos

Los costos de implementación del proyecto comienzan con el proceso de modificación del permiso de servicios limitados con el que actualmente cuenta la planta. Este tipo de proceso es encargado a alguna empresa de telecomunicaciones. El valor de este servicio es averiguado al consultar un ingeniero que participó en el anterior proceso de modificación y, se supone, debería bordear el millón de pesos.

En cuanto a la mano de obra, se estima que algunas de las tareas pueden ser realizadas por personal del área de electro control, particularmente el personal del taller de electrónica, que trabaja usualmente con equipos de radio, y está familiarizado con este tipo de sistemas. Además, se comprueba como el equipo de inspección del emisario estaría perfectamente habilitado para la instalación de antenas y labores de montaje. Entonces los costos de este trabajo se deberían considerar en horas hombre, más que en un costo monetario para la empresa. Al conversar de este tema con el tutor de memoria se decide que esta cantidad de horas hombre no debería ser considerada en el balance de costos del proyecto. Sí, debería considerarse el precio de un ingeniero de telecomunicaciones que guíe la ejecución del proyecto. El costo de mano de obra de este ingeniero, que debería trabajar por un tiempo de un mes aproximadamente, se estima en \$2.000.000.

Las antenas a utilizar serían de las mismas características de la usada en la prueba de cobertura de radio, es decir, una antena Ringo Ranger II de 6dB. La mejor oferta encontrada es un valor de \$30.000 para una antena marca Walmar, en el sitio [www.equirad.cl](http://www.equirad.cl). Los equipos de radio seleccionados, son los que cumplen justamente con las características esperadas, y que son los más baratos. Los equipos elegidos son:

### **Radio base:** RADIO MOVIL BASE UHF 50W KENWOOD TK-8302H

- Sistema integrado de encriptación de 16 códigos.
- Compatible con señalización QT/DQT, para bloquear mensajes indeseados.
- Capacidad para programar 16 canales, de los cuales sólo se utilizarán 2.

### **Radio portátil:** RADIO PORTATIL UHF KENWOOD TK3402M

- Sistema integrado de encriptación de 16 códigos.
- Escaneo de canales.
- Hasta 16 canales programables.
- Duración de batería de más de 12 horas. Se estima que la duración de la batería debería ser mayor que la duración de un turno de 8 horas de los equipos de inspección del emisario. Se necesitarían entonces por lo menos 3 equipos portátiles.
- Se debe comprar un MICROFONO PALMA KENWOOD KMC-45 para cada equipo portátil. Pues este dispositivo permite una cómoda comunicación en caso de estar realizando labores paralelamente.

Las mejores ofertas para estos equipos se encuentran con el proveedor [www.electronisys.cl](http://www.electronisys.cl), y corresponden a un valor de \$178.500 para la radio base, \$147.890 para la radio portátil y \$56.965 para el micrófono de palma. Acá también se encuentra la mejor oferta para fuente de poder, donde una fuente Samlex SEC-1223 con cargador de batería tiene un precio de \$108.000.

El equipo conversor RoIP tiene un valor de \$1.132.160 a lo que debe sumarse un cable de audio especial para conectar a radio base con un costo de \$101.354. Estos precios son los que ofrece el representante en Chile de la marca de estos equipos, ICOM.

Con respecto al sistema a los cables coaxiales, no se logra encontrar mucha oferta con precios en los catálogos de internet, pero en la empresa Esmeralda S.A. se encuentra cable marca Times Microwave LMR195, con valor \$1.690 por metro. En esa misma empresa se haya los conectores para el cable coaxial con valor \$2.320 y las abrazaderas para fijación de antena a \$7.390. Se debe considerar también un mástil al que fijar la antena, para antenas Ringo Ranger se recomienda utilizar por lo menos un mástil de 50 cm. La alternativa encontrada es un mástil de 1 m y 1 pulgada de diámetro, el valor es \$3.247 en la página [www.serinternet.cl](http://www.serinternet.cl)

Al buscar alternativas para la batería, se nota que la marca más popular es Curtis, y los precios son mucho menores entre los proveedores de equipos para energías renovables que para los proveedores de equipos de radio. Finalmente, en [www.solarshop.cl](http://www.solarshop.cl) se encuentra una batería Curtis de ciclo lento de 12V y 55Ah, a \$79.000. Esta batería entregaría una autonomía de 26 horas, a la estación de radio.

Se debe considerar 8 la instalación de 8 estaciones de radio, y como la documentación de varios equipos carece de información como métodos de mantención y tiempo medio entre fallas, se decide que una forma de reaccionar ante fallas es la compra de equipos para que estén en bodega, como soporte. Estos equipos adicionales deberían ser una radio base, una radio portátil, una fuente de poder y un conversor RoIP. Los catálogos de las baterías indican que estas son libres de mantenimiento y que su vida útil es de 8 años, dependiendo del uso (que en este caso sería muy bajo). Finalmente, el balance de costos se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 8 Detalle de costos

Equipo	Cantidad	Costo	Subtotal
Radio base	9	\$178500	\$1606500
Radio portátil	4	\$147890	\$591560
Micrófono de palma	3	\$56965	\$170895
Antena	8	\$30000	\$240000
Cable coaxial [m]	120	\$1690	\$202800
Conectores	16	\$2320	\$37120
Abrazaderas	16	\$7390	\$118240
Mástil	8	\$3247	\$25976
Convertidor RoIP	9	\$1132160	\$10189440
Cable de audio RoIP	8	\$101354	\$810832
Fuente de Poder	9	\$108000	\$972000
Batería	8	\$79000	\$632000
Mano de obra	1	\$2000000	\$2000000
Modificación permiso	1	\$1000000	\$1000000
		<b>Total</b>	<b>\$18597363</b>

Se obtiene un precio bastante menor que el del proyecto de telecomunicaciones rechazado con anterioridad e incluso se consideran equipos de recambio en caso de fallas. El precio de este nuevo proyecto es 38% menor que el proyecto antes rechazado, lo que es muy bien recibido por la jefatura, quienes plantean que el proyecto tendría grandes chances de ser aceptado y financiado.

## 7.7 Plan de implementación

Entre los plazos de realización del proyecto, el primer paso es bastante demoroso y se trata de la modificación del permiso de servicios limitados. Este proceso puede demorar hasta 3 meses. Luego, las labores a realizar toman bastante menos tiempo. Primero, se debe configurar las antenas de radio, para que funcionen en forma óptima según la banda de frecuencia a utilizar. También se deben programar los equipos radio. Estas 2 tareas no debiesen tomar más de dos semanas si se le encargara al equipo del taller de electrónica.

Finalmente, sólo quedaría realizar las instalaciones de las estaciones de radio en las cámaras de sectorización. Este proceso ya se ha realizado durante las pruebas de cobertura de radio, pero obviamente, el montaje no tenía la complejidad de un montaje definitivo. Igualmente, esa experiencia muestra que se podrían instalar 1 estaciones por día, si trabajaran 2 personas. La labor de montaje considera la fijación de las antenas, la canalización del cableado y la instalación de gabinetes para alojar los equipos de radio. Como todo esto se puede realizar sin contar con los equipos de radio, es que se considera posible, comenzar las labores de montaje en paralelo con la configuración de equipos de radio.

Tras los 8 días destinados a la instalación de las 8 estaciones de radio se destinan 2 días para solucionar problema de montaje y para terminar posibles obras que no haya sido posible terminar en el tiempo estimado. Tras la instalación de las estaciones se considera 3 días para conectar los equipos de radio y evaluar el desempeño del sistema. La carta Gantt para la implementación del proyecto quedaría como sigue y el plazo de implementación sería de 4 semanas, sin considerar los 3 meses necesarios para obtener permiso de la SUBTEL.

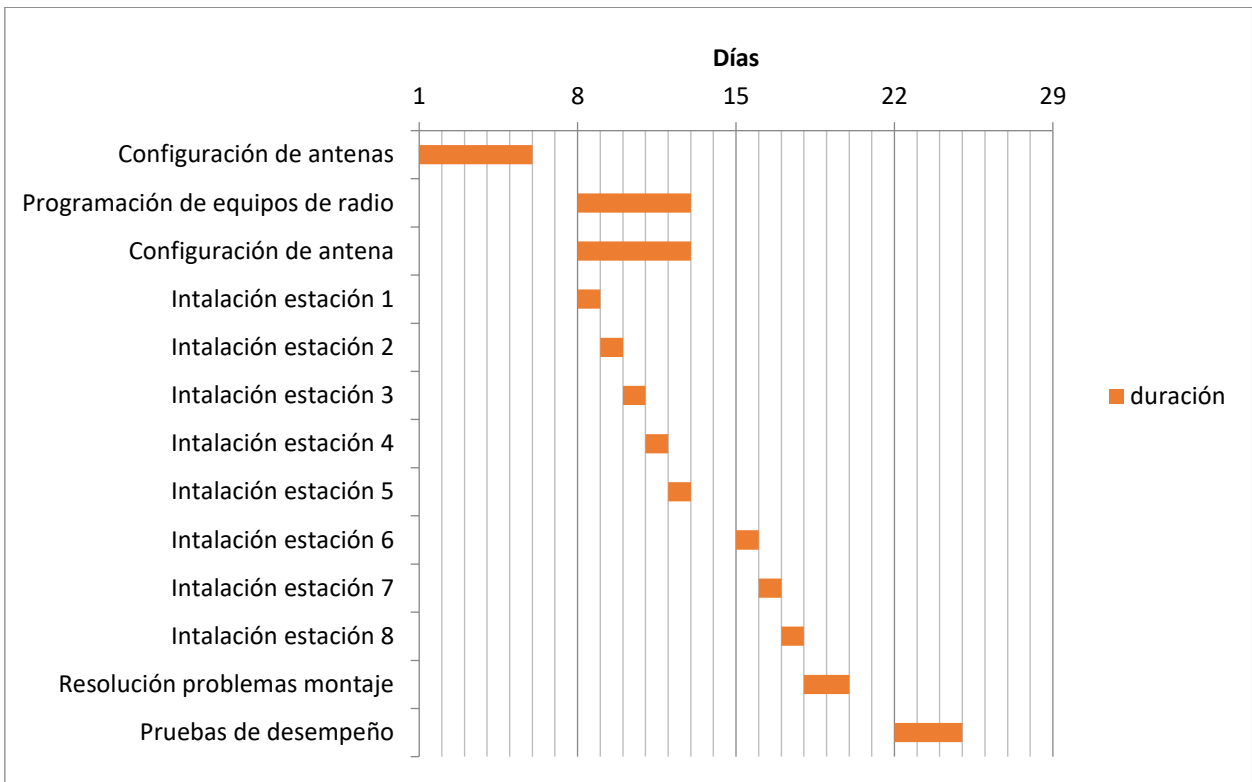


Ilustración 49 Carta Gantt para implementación del proyecto

## 8 Conclusiones

La conclusión más importante de este trabajo, es la demostración de que existe una solución técnica, económica y eficiente, que cumple de manera apropiada los requerimientos definidos para el proyecto. Este trabajo logró convertir esa solución en el diseño de un sistema de telecomunicaciones con una arquitectura, una lista de materiales, un balance de costos y un plan de implementación. Esta solución tiene un costo bastante menor a la alternativa anteriormente presentada por una empresa externa para resolver el mismo problema, con aproximadamente un 35% de diferencia.

Este estudio considera, no sólo el aspecto técnico exclusivo de radio comunicaciones, sino también, el problema de fondo en forma integral. Esto permite acotar el tamaño del proyecto, reconociendo puntos críticos para el sistema de conducción de efluentes y, por lo tanto, puntos críticos para la cobertura del sistema de radio comunicación. Estos puntos críticos corresponden en primer lugar a las cámaras de sectorización, luego las cámaras de venteo y luego todas las demás cámaras de inspección. Fuera de las cámaras de inspección no hay registro de fallas de funcionamiento, porque esas zonas tienen una relevancia menos dentro del diseño realizado.

Las medidas consideradas en el diseño de esta solución aseguran que su implementación no producirá ningún efecto negativo en el buen funcionamiento del sistema de descarga al mar y sus numerosas componentes. Es más, mejorará la calidad de las labores de mantenimiento preventiva o correctiva, al permitir que el personal en terreno cuente con el apoyo remoto del personal en planta, incluso mientras se encuentra al interior de cámaras de inspección y realizando maniobras, pues el sistema de radios *push-to-talk* es muy simple de utilizar y permite libertad de movimiento.

Luego de la investigación realizada, se comprueba que el problema de telecomunicaciones abordado, está incluido en un problema mayor que es la operación de un sistema sanitario rechazado por toda una comunidad, debido la inminencia de algún desastre ambiental. También es un sistema que funciona bajo importantes compromisos con las autoridades medioambientales. Y además un sistema que su falla puede limitar e incluso inhabilitar el funcionamiento de toda la planta Celulosa Nueva Aldea, por lo tanto, la dimensión económica del problema es enorme. Debido a la gran magnitud del tema en el que se inserta este trabajo de memoria, es que se hizo muy difícil poder otorgar un valor de beneficio al proyecto realizado. Entonces, acá se encuentra un objetivo que no fue logrado como se esperaba y finalmente el valor que tiene el proyecto es solamente cumplir con el requerimiento propuesto por la empresa.

El contraste entre pruebas en terreno y las predicciones obtenidas desde el modelo Longley-Rice y el software *Radio Mobile*, comprueban la confiabilidad de los valores teóricos, con errores en los límites de cobertura que no superan los 500 m. Aunque se comprueba también la incoherencia que se genera, para ambientes urbanos, donde las mediciones prácticas poco tenían que ver con los resultados entregados por el software. Se destaca la utilidad de esta herramienta en el diseño del sistema de telecomunicaciones, pues gracias a su utilización se decide quitar dos estaciones del diseño original, ahorrándose por lo menos 4 millones de pesos. Así mismo, se destaca la utilidad de la realización de pruebas en terreno, pues se comprueba que con sólo elementos existentes en la planta, sin grandes gastos, se logra comprobar en forma muy clara la factibilidad del proyecto.

Respecto a los equipos necesarios para realizar la obra, se comprueba la disponibilidad de todos estos en el mercado nacional, lo que simplifica el proceso de compras, y que los precios terminan definiendo un balance total conveniente, que cumple con las limitaciones de costos. Algunos de los equipos considerados ya han sido comprados por la empresa con anterioridad, lo que simplifica aún más el proceso de cotización y de compra. Se sugiere, como trabajo futuro, estudiar la mecánica involucrada en el transporte de efluentes en sistemas de este tipo y abordar el problema más rigurosamente desde la fase preventiva. Esto pues se cree que existen otras mejoras que podría tener un impacto mucho más significativo, como por ejemplo la revisión de los sistemas de alarmas de falla. Se concluye además que una posible forma de reducir los costos de implementación, de un sistema de telecomunicaciones de estas características, sería el diseño y construcción de conversores RoIP. Esto debido a la escasa oferta y el elevadísimo valor de estos conversores (aproximadamente M\$1,5). Cuando el dispositivo no hace más que digitalizar una señal de audio análoga y transmitirla mediante protocolo IP. Si a esto se agrega que probablemente este mismo problema de comunicación sucede en muchos otros sistemas de descarga al mar; no sería descabellado pensar que si existe el mercado necesario y la economía de escala que justifique el desarrollo de un nuevo dispositivo.

## 9 Bibliografía

**Barclay, L. 2003.** *Propagation of Radiowaves 2nd Edition*. Londres : Institution of Electrical Engineers, 2003.

**Decreto N°127. 1982.** *CHILE. Plan General de Uso del Espectro Radioeléctrico*. Santiago de Chile : Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 1982.

**Graham, A. W., Kirkman, N. C. and Paul, P. M. 2006.** *Network Design in the VHF and UHF Bands: A Practical Approach*,. s.l. : John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

**Hufford, Longley y Kissick. 1982.** *A Guide to the Use of the Use of ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*. s.l. : U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 1982. pág. 10.

**ITU-R P.1812-4. 2015.** *ITU-R P.1812-4 A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*. 2015.

**ITU-R P.617-1 . 1992.** *PROPAGATION PREDICTION TECHNIQUES AND DATA REQUIRED FOR THE DESIGN OF TRANS-HORIZON RADIO-RELAY SYSTEMS*. 1992.

**Ley N°18168 . 1982.** *CHILE. LEY GENERAL DE TELECOMUNICACIONES*. Santiago de Chile : MINISTERIO DE TRANSPORTE Y TELECOMUNICACIONES, 1982.

**Longley, A.G., Rice, P.L. 1968.** *Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss over Irregular Terrain. A Computer Method*. s.l. : Environmental Science Services Administration, 1968.

**Res. Ex. N°352. 1985.** *Instructivo Relativo a los Servicios Limitados*. Santiago : Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 1985.

**Res. Ex. N°391. 1985.** *Marco Técnico Relativo a los Servicios Limitados*. Santiago : Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 1985.

**Res. Exenta N°51/2006. 2006.** *Chile*. Concepción : COMISIÓN REGIONAL DEL MEDIO AMBIENTE OCTAVA REGIÓN DEL BIO BIO, 2006.

**Rice, P. L., y otros. 1965.** *Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits*. s.l. : U.S. National Bureau of Standards, 1965. Vol. II.

—. **1965.** *Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits Vol I*. s.l. : U.S. National Bureau of Standards, 1965. Vol. I.

**SUBTEL. 2005.** *Cuadro de atribución de Bandas de Frecuencia en Chile*. 2005.

**UIT-R. 2012.** *Reglamento de Radiocomunicaciones*. s.l. : UIT-R, 2012. Vol. I.



# 1 Anexos

## 1.1 Solución basada en red celular

Esta solución fue estudiada, se realizaron pruebas de cobertura, y resultaba ser una solución posible. Su costo de implementación y la simplicidad de las instalaciones necesarias la hacían una atractiva alternativa pero, debido a requerimientos de la empresa, esta solución fue descartada. La principal razón es que se necesita utilizar redes celulares públicas, lo que pondría en peligro la eficacia del sistema en caso de situaciones de colapso de las redes, como suele suceder ante desastres naturales.

### 1.1.1 Prueba de cobertura celular

Para tener un primer acercamiento con el problema de conectividad con el emisario, se realiza una prueba de cobertura celular. La idea es poder evaluar la factibilidad de desarrollo de una solución que utilice la red celular, además conocer la geografía del sector y pasar desde la teoría de propagación de ondas, a la práctica, para entender a grandes rasgos cuales son los factores más críticos para la situación estudiada.

La prueba realizada es bastante simple, sólo se utiliza el medidor de nivel de señal integrado en un teléfono celular con sistema Android y además el sistema GPS de este último. Con la ayuda de la aplicación My Tracks, se grabó el recorrido realizado y se tomó notas de los niveles de señal, para ciertos puntos. Se realiza la misma ruta, realizada por los equipos de inspección del emisario, siguiendo un recorrido de unos 100 Kms, para cubrir los 54 Kms de ducto, desde la planta al mar.

Antes de realizar la prueba se averigua en la página web de la SUBTEL la distribución de antenas de red celular en la zona, especialmente las pertenecientes a la red movistar, que es la compañía a la que pertenece el móvil utilizado para el test. No se pudo tener acceso a los números de identificación de las antenas y sus celdas, por lo tanto no se podía saber a ciencia cierta a que antena uno estaba conectado, pero dado que la distribución de antenas para la zona no es muy densa, generalmente era evidente.

En un principio la idea de esta prueba era realizar un trabajo de comparación entre la teoría y práctica mucho más profundo, incluso se averigua la forma de arrendar un medidor de espectro. Luego, teniendo medición precisa de nivel de señal, las posiciones de las antenas y los perfiles topográficos poder comparar los coeficientes de error de distintos modelos de propagación de ondas y entonces elegir el modelo más adecuado para utilizarlo como base para cualquier futuro cálculo. Finalmente se entiende que este trabajo sería muy interesante para la memoria, pero no imprescindible para el desarrollo de la solución de telecomunicaciones, por lo tanto, se considera el arriendo de un medidor de espectro, como un gasto injustificado. A esto se suma el hecho de que no se pudo tener acceso a la información de las ID de las celdas por lo tanto cualquier cálculo no podría ser tan preciso.

Se toma esta experiencia como una forma de reconocer el terreno y evaluar cuan grave es el problema de conectividad celular.

Tras realizar la prueba, se realiza un mapa con los niveles de señal medidos, las antenas de la red Movistar y las cámaras de sectorización del emisario, para tener la referencia con el proyecto. Se utiliza íconos de calor calipso para señalar las antenas, azules para las cámaras de sectorización del emisario, lila para la planta, y los niveles de señal se clasifican en 4 categorías: rojas cuando para nivel de señal menor a -99dB, naranja entre -95dB y -98dB, verde claro entre -94dB y 80dB, y verde oscuro para nivel mayor a 80dB. El mapa resultante se muestra en la Ilustración 50.

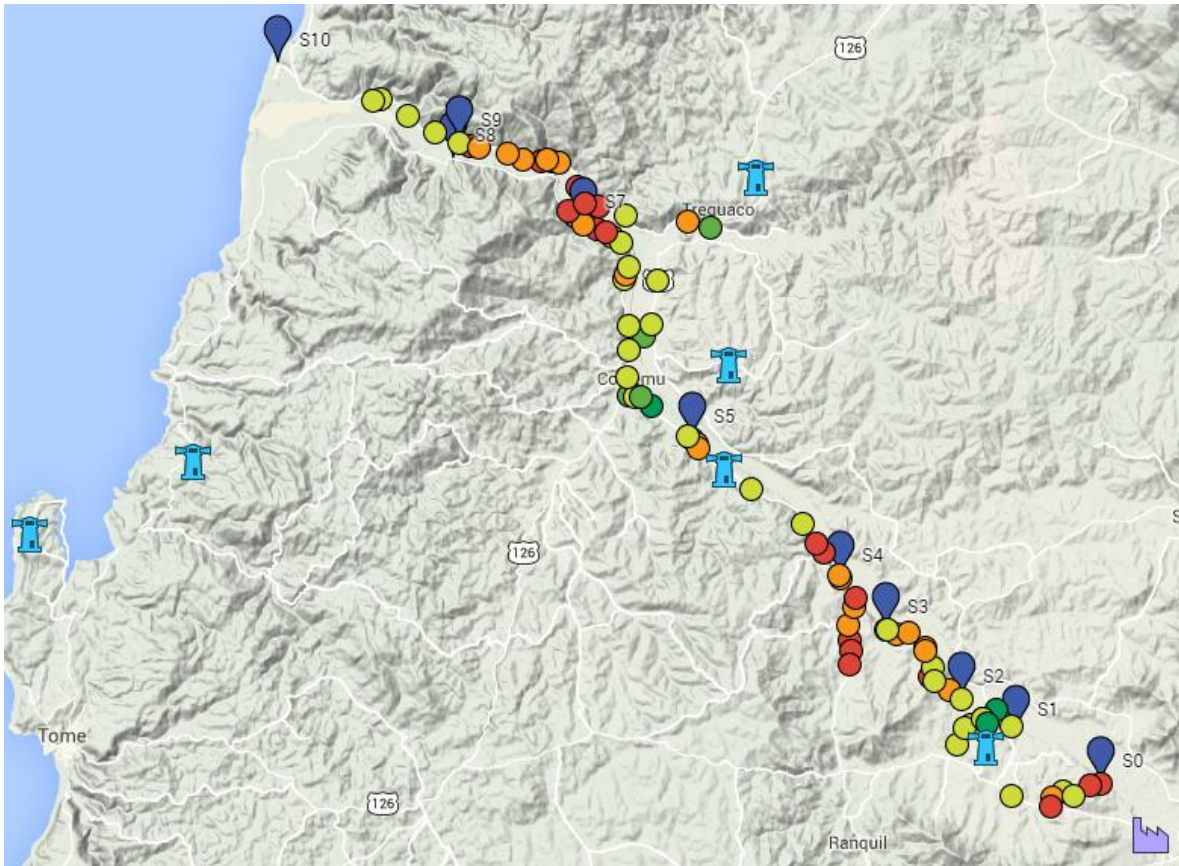


Ilustración 50 Prueba de cobertura celular

Según la literatura revisada un nivel de -95 dB debería ser el límite para poder establecer una llamada, pero con el teléfono utilizado se logró comprobar que hasta un nivel de -98 era posible establecer una llamada sin problemas. La división de colores responde a esto último, rojo para puntos donde no es posible establecer llamadas, naranja para puntos límites donde aún se puede establecer llamada, verde claro para puntos con buen nivel de señal, y verde oscuro para puntos donde la señal es notablemente alta.

El análisis de los resultados de esta prueba no se sigue desarrollando más en profundidad, pues una solución que utilice la red celular, no corresponde con los deseos de la empresa, lo que se determina en una reunión con la jefatura. Esto último se explica en más detalle en la sección de evaluación de soluciones.

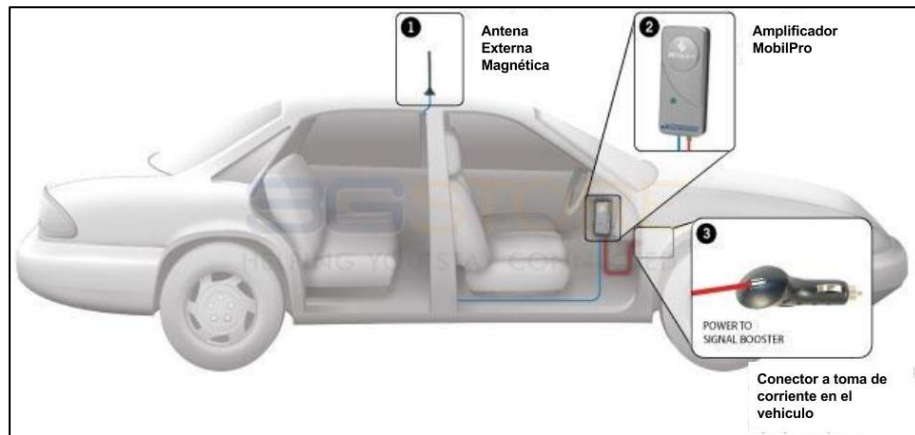
La primera opción resulta ser de muy fácil implementación, y la inversión inicial sería mucho más baja que para las otras alternativas. Pero por otro lado implicaría el pago mensual de un plan de datos de telefonía, y lo más grave, sería un sistema que dependería del buen funcionamiento de una red externa. Las redes de telefonía, son redes que han demostrado nos ser 100% confiables, especialmente en situaciones extremas, como desastres naturales, y para ciertas fechas donde se produce congestión. Estas razones son las presentadas por la jefatura encargada de este proyecto, para demostrar que esta solución debería ser descartada. A esto se suma el testimonio del superintendente, en que asegura haber utilizado alguna vez un sistema de amplificación de señal celular, sin obtener los resultados deseados, produciéndose igualmente áreas ciegas de cobertura. De esto último no existen registros, pero igualmente ante estas razones se entiende que no se puede defender esta solución, por lo que se decide descartarla.

### 1.1.2 Soluciones disponibles en el mercado basadas en utilización de red celular

Luego de realizadas las pruebas en terreno de cobertura celular se comprueba que el problema no es tan grave, pues la mayor parte del recorrido realizado cuenta con servicio. Si bien hay algunas zonas donde el nivel de señal no permite establecer una llamada, al revisar los registros se puede observar que para estos casos críticos, el nivel de señal igualmente no baja de los -114dB. Entonces, se comienza a buscar alguna alternativa que permita amplificar la señal y lograr pasar niveles de señal mayores que permitan establecer una llamada.

En terreno se comprueba que con nivel de señal -98 dB aún se puede establecer una conversación, pero a nivel -100 dB, ya se presentan cortes de llamada. Tomando estos números en cuenta se deduce que es necesario un sistema de amplificación que por lo menos pueda lograr un aumento de 16dB, entre -114 y 98 dB, lo que sería ampliamente satisfecho con dispositivos de amplificación de señal que se encuentran en el mercado, como los ofrecidos por la empresa Wilson Electronics. Wilson electronics, entre sus productos ofrece soluciones hechas para montaje en vehículos, cuya versión más básica permite amplificar la señal, para los teléfonos celulares al interior del vehículo, en hasta en 40 dB. Vale decir que el equipo de personas que recorre el emisario, quienes tienen el problema de conectividad, se movilizan permanentemente en camioneta, por lo tanto la solución anterior sería perfecta.

En la Ilustración 51 se muestra la manera en que se realiza el montaje del dispositivo MobilePro Dual-Band de Wilson Electronics, con una antena exterior de ganancia 2.3dBi conectada a un dispositivo amplificador con antena interna, el que irradia la señal amplificada en 40dB al interior del automóvil.



*Ilustración 51 Montaje amplificador de señal celular*

Como desde el principio del proyecto se establece que la solución requerida debería ser idealmente utilizando radios push-to-talk, por la capacidad que ofrecen de entregar comunicación entre grupos de personas, y además lo práctico que es la capacidad de comunicarse con solo apretar un botón, se busca alguna alternativa que ofrezca similares características. Es entonces cuando se encuentran justamente varias alternativas de aplicaciones Android, estas aplicaciones permiten transformar el equipo celular en un dispositivo de comunicación push-to-talk, enviando mensajes de voz en tiempo real a grupos de conversación configurables, en donde los participantes sólo deben estar conectados a internet y crear una cuenta en los servidores de la aplicación. Esto último significa que la aplicación permite comunicación multi plataforma entre redes celulares, wifi, redes Ethernet, etc. Las opciones más populares en Google Play Store son las aplicaciones Zello y Voxer, pero para Voxer, la opción gratuita es muy limitada, por lo tanto Zello es la opción con la que se realizan algunas pruebas de rutina.

La aplicación Zello incluso tiene compatibilidad con micrófono-audífono PPT (push to talk), iguales a los utilizados en las radio push to talk, lo que permitiría obtener la misma cuota de comodidad en la comunicación que estas últimas. Incluso existe la opción de utilizar un micrófono-audífono bluetooth lo que permitiría aún más libertad de movimiento. En la Ilustración 52 se muestra un esquema del funcionamiento de la aplicación Zello.



*Ilustración 52 Esquema funcionamiento aplicación Zello*

La utilidad que ofrecería el micrófono-audífono bluetooth es que permitiría dejar el teléfono dentro del vehículo, donde estaría instalado un amplificador de señal, para luego salir del vehículo a realizar operaciones, solo con el dispositivo bluetooth, sin arriesgarse a perder la calidad de la señal celular.

Al realizar pruebas básicas con esta aplicación, se comprueba que sólo funciona de buena manera, para conexión 3G, con intensidad de señal mayor a 90dB. Para intensidades menores, o conexiones 2G, el retraso se torna demasiado alto para establecer una comunicación correcta y fluida. La calidad de sonido es notable, y el consumo de datos es bastante bajo, de alrededor de 50kB por 10 segundos de mensaje.