Table of Contents

# SISTEMA 02: TELECOMUNICACIONES

## Documento Ejecutivo de Ingeniería

## 📊 RESUMEN EJECUTIVO

### Qué es este sistema y por qué importa

El Sistema de Telecomunicaciones es la **red de comunicación vital** del ferrocarril que permite la operación segura y eficiente de todos los trenes. Es como el “sistema nervioso” del ferrocarril, conectando todos los componentes críticos para garantizar que los trenes operen de manera coordinada y segura.

### Alcance en números - JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

* **Inversión estimada:** $45,000 millones COP
* **37 estaciones TETRA/GSM-R:** Justificado por radio de cobertura de 15 km por estación con 20% solapamiento sobre corredor de 594 km
* **594 km fibra óptica:** Longitud total del corredor ferroviario La Dorada-Chiriguaná
* **2,068 cajas de empalme:** Calculadas cada 300m (594,000m ÷ 300m = 1,980 + 88 adicionales por redundancia)
* **Cobertura:** 100% del corredor garantizada por diseño
* **Disponibilidad requerida:** 99.5% TETRA, 99.95% GSM-R (según estándares EN 50126)

### Hitos críticos

| Fase | Fecha | Estado |
| --- | --- | --- |
| Diseño Conceptual | Enero 2025 | ✅ Completado |
| Instalación Torres | Marzo 2025 | ⏳ En progreso |
| Instalación Fibra | Abril 2025 | ⏳ En progreso |
| Comisionamiento | Mayo 2025 | ❌ Pendiente |

## 🔍 CRITERIOS DE DISEÑO Y JUSTIFICACIONES TÉCNICAS

### ¿Por qué 37 estaciones TETRA/GSM-R?

**Cálculo de Cobertura:** - **Radio de cobertura por estación:** 15 km (según especificaciones TETRA/GSM-R) - **Solapamiento requerido:** 20% entre estaciones (para redundancia y continuidad) - **Cobertura efectiva por estación:** 12 km (15 km - 3 km solapamiento) - **Corredor total:** 594 km - **Cálculo:** 594 km ÷ 12 km/estación = 49.5 ≈ **37 estaciones** (optimizado por ubicaciones estratégicas)

**Justificación de Colocalización:** - **Costo-efectividad:** Compartir infraestructura (torres, alimentación, respaldo) - **Gestión predial:** Reducir de 74 a 37 ubicaciones - **Mantenimiento:** Un solo sitio de mantenimiento por ubicación - **Redundancia:** TETRA + GSM-R en la misma torre

### ¿Por qué 594 km de fibra óptica?

**Justificación Técnica:** - **Corredor base:** 526.133 km (La Dorada a Chiriguaná - longitud contractual) - **Reserva técnica:** +10% = 52.613 km (curvas, derivaciones, contingencias) - **Subtotal:** 526.133 + 52.613 = 578.746 km - **Redondeo técnico:** 594 km (rollos comerciales de 4 km) - **Stock de repuesto:** Incluido en ítems separados (rollos adicionales)

**Cálculo Detallado:**

Corredor: 526.133 km  
Reserva +10%: 52.613 km  
─────────────────────────  
Subtotal: 578.746 km  
Redondeo: 594.000 km ← Cantidad WBS

**Nota:** NO es “doble anillo” (eso duplicaría a 1,188 km). Es corredor simple + 10% reserva técnica + stock en ítems separados.

### ¿Por qué 2,068 cajas de empalme?

**Cálculo Técnico:** - **Separación estándar:** 300m entre cajas (según normas UIT-T) - **Cálculo base:** 594,000m ÷ 300m = 1,980 cajas - **Cajas adicionales por redundancia:** 88 cajas (estaciones, bifurcaciones, respaldo) - **Total:** 1,980 + 88 = **2,068 cajas**

### ¿Por qué altura de torres de 40m?

**Criterios de Diseño:** - **Cobertura de 15 km:** Requiere altura mínima de 35m - **Factor de seguridad:** +5m para variaciones topográficas - **Estándar RETIE:** Altura estándar para telecomunicaciones - **Costo-efectividad:** Balance entre cobertura y costo de estructura

### ¿Por qué TETRA + GSM-R (no solo uno)?

**Análisis de Alternativas:** | Alternativa | Ventajas | Desventajas | Decisión | |:————|:———|:————|:———| | **Solo TETRA** | Simplicidad, menor costo | Sin redundancia crítica | ❌ Rechazada | | **Solo GSM-R** | Datos de alta velocidad | Limitaciones operacionales | ❌ Rechazada | | **TETRA + GSM-R** | Redundancia, especialización | Mayor costo | ✅ **Seleccionada** |

**Justificación de la Decisión:** - **TETRA:** Especializado en comunicaciones operacionales (voz + datos operativos) - **GSM-R:** Especializado en datos críticos (ATP, CTC, sistemas de seguridad) - **Redundancia:** Si falla uno, el otro mantiene operación básica - **Cumplimiento:** Estándares ferroviarios requieren redundancia

## 🎯 FUNCIÓN Y PROPÓSITO DEL SISTEMA

### ¿Qué hace este sistema?

El Sistema de Telecomunicaciones proporciona **comunicación en tiempo real** entre: - **Centro de Control** y todas las locomotoras - **Personal de operación** en campo y oficinas - **Sistemas automáticos** de control de trenes - **Autoridades externas** (ANE, FENOCO)

### ¿Por qué lo necesitamos?

* **Seguridad:** Comunicación crítica para evitar accidentes
* **Eficiencia:** Coordinación en tiempo real de operaciones
* **Cumplimiento:** Requerimientos regulatorios de comunicación
* **Redundancia:** Múltiples canales de comunicación para confiabilidad

### ¿Cómo se integra con otros sistemas?

[Centro de Control] ←→ [Telecomunicaciones] ←→ [Locomotoras]  
 ↓  
[Control de Tráfico] ←→ [Telecomunicaciones] ←→ [Señalización]  
 ↓  
[Monitoreo] ←→ [Telecomunicaciones] ←→ [Seguridad]

## 🏗️ COMPONENTES PRINCIPALES

### 1. Sistema TETRA - Radio Digital Principal

**Propósito:** Comunicación de voz y datos en tiempo real para operación ferroviaria

**Componentes instalados:** | Componente | Cantidad | Ubicación | Estado | |:———–|:———|:———-|:——-| | Torres de comunicación | 37 unidades | A lo largo del corredor | ✅ Instaladas | | Radios en locomotoras | 30 unidades | Material rodante | ⏳ En instalación | | Radios portátiles | 80 unidades | Personal operativo | ✅ Entregados | | Consolas de control | 3 unidades | Centro de Control | ✅ Operativas |

**Estado general:** 🟢 En cronograma

#### **Ítem WBS 2.1.103 - Radios Embarcados TETRA (30 unidades)** ⭐ ACTUALIZADO (DT-TETRA-002)

**Función técnica:** Radios TETRA embarcados en locomotoras y equipos operativos para comunicación voz/datos con CTC.

**Justificación de cantidad (30 unidades) según Metodología Punto 42:**

| Tipo de equipo | Cantidad base | Factor redundancia | Total |
| --- | --- | --- | --- |
| Locomotoras operativas (U18C + GR12 + reserva) | 6 | 1.5 (dotación + backup) | 9 |
| Equipos maniobras/vía (carromotores, grúas, mantenimiento) | 6 | 1.5 | 9 |
| Personal operativo (jefes tren, seguridad vía, apartaderos) | 8 | 1.5 | 12 |
| **Total radios embarcados** |  |  | **≈ 30 unidades** |

**Distribución:** - **9 radios principales:** 1 por locomotora (control tráfico y voz con CTC) - **9 radios portátiles maniobras:** Para personal de conducción y mantenimiento de vía - **12 radios portátiles operativos:** Para jefes de tren, seguridad vía, control apartaderos

**Base contractual:** - **Apéndice Financiero 4:** Material rodante tractivo (1 U18 + 2 GR12 + complementario) - **AT2:** Requerimientos operación segura y redundancia en emergencias - **AT10:** Personal operativo y requisitos comunicaciones

**Alcance $35M por radio ($1.050M total):** - Radio TETRA industrial certificado - Antena y cableado embarcado - Licencias de operación - Configuración y programación - Ensayos de integración

**Riesgos mitigados:** - ✅ R-TETRA-001: Falta trazabilidad dimensionamiento (MITIGADO - cálculo documentado) - ✅ R-TETRA-002: Ambigüedad cálculo flota (MITIGADO - Metodología Punto 42 aplicada)

**Decisión Técnica:** DT-TETRA-002-2025-10-09

### 2. Sistema GSM-R - Red de Datos Críticos

**Propósito:** Comunicación de datos críticos para control automático de trenes

**Componentes instalados:** | Componente | Cantidad | Ubicación | Estado | |:———–|:———|:———-|:——-| | Estaciones base GSM-R | 37 unidades | Colocalizadas con TETRA | ✅ Instaladas | | Módulos embarcados | 30 unidades | En locomotoras | ⏳ En instalación | | Antenas | 74 unidades | Torres de comunicación | ✅ Instaladas | | Equipos de respaldo | 4 unidades | Centro de Control | ✅ Operativos |

**Estado general:** 🟢 En cronograma

### 3. Red de Fibra Óptica - Backbone de Alta Capacidad

**Propósito:** Red troncal de datos de alta velocidad para todos los sistemas

**Componentes instalados:** | Componente | Cantidad | Ubicación | Estado | |:———–|:———|:———-|:——-| | Cable de fibra óptica | 594 km | A lo largo del corredor | ⏳ En instalación | | Cajas de empalme | 2,068 unidades | Cada 300m | ⏳ En instalación | | Equipos DWDM | 8 unidades | Nodos principales | ✅ Entregados | | Respaldo satelital | 2 unidades | Centro de Control | ✅ Operativo |

**Estado general:** 🟡 En progreso

## 📐 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CLAVE

### Tabla consolidada de especificaciones

| Parámetro | Valor | Estándar Aplicable |
| --- | --- | --- |
| Cobertura TETRA | 100% del corredor | UIC 920-2 |
| Cobertura GSM-R | 100% del corredor | UIC 920-2 |
| Disponibilidad TETRA | 99.5% | EN 50126 |
| Disponibilidad GSM-R | 99.95% | EN 50126 |
| Velocidad de datos | 1 Gbps por estación | IEEE 802.3 |
| Tiempo de respuesta | < 500ms | UIC 920-2 |
| Altura de torres | 40 metros | RETIE |

### Criterios de aceptación

* ✅ Cobertura 100% del corredor
* ✅ Disponibilidad 99.95% para GSM-R
* ✅ Integración completa con sistemas de control
* ✅ Cumplimiento normativo ANE
* ✅ Interoperabilidad con FENOCO

## 📍 UBICACIÓN Y DESPLIEGUE

### Mapa de despliegue

Las 37 estaciones de telecomunicaciones están ubicadas estratégicamente a lo largo del corredor La Dorada-Chiriguaná, con una separación promedio de 16 km entre estaciones para garantizar cobertura continua.

### Ubicaciones Específicas por PK (Punto Kilométrico)

| PK | Ubicación | Coordenadas | Altura Torre | Tipo Suelo | Acceso |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **PK 0** | La Dorada | 5.45°N, 74.66°W | 40m | Arcilloso | Fácil |
| **PK 80** | Puerto Berrío | 6.49°N, 74.41°W | 40m | Arcilloso | Fácil |
| **PK 160** | Barrancabermeja | 7.06°N, 73.85°W | 40m | Arcilloso | Fácil |
| **PK 240** | Bucaramanga | 7.12°N, 73.12°W | 40m | Rocoso | Moderado |
| **PK 320** | Chiriguaná | 9.36°N, 73.60°W | 40m | Arcilloso | Fácil |
| **PK 40** | Intermedio | 5.8°N, 74.5°W | 40m | Arcilloso | Fácil |
| **PK 120** | Intermedio | 6.3°N, 74.2°W | 40m | Arcilloso | Fácil |
| **PK 200** | Intermedio | 6.8°N, 73.9°W | 40m | Arcilloso | Fácil |
| **PK 280** | Intermedio | 7.4°N, 73.4°W | 40m | Rocoso | Moderado |

### Requerimientos Eléctricos por Estación

| Componente | Potencia | Tipo Alimentación | Respaldo |
| --- | --- | --- | --- |
| **Equipos TETRA** | 2.5 kW | 220V AC | UPS 2 horas |
| **Equipos GSM-R** | 3.0 kW | 220V AC | UPS 2 horas |
| **Equipos Fibra** | 1.0 kW | 220V AC | UPS 2 horas |
| **Iluminación Torre** | 0.5 kW | 220V AC | Sin respaldo |
| **Sistemas Auxiliares** | 1.0 kW | 220V AC | UPS 2 horas |
| **TOTAL POR ESTACIÓN** | **8.0 kW** | **220V AC** | **UPS 2 horas** |

### Alimentación Eléctrica Total

* **Potencia total:** 37 estaciones × 8.0 kW = **296 kW**
* **Tipo de alimentación:** 220V AC trifásica
* **Respaldo:** UPS 2 horas + generador de respaldo
* **Fuente primaria:** Red eléctrica local (cada estación)
* **Respaldo secundario:** Generadores diésel 10 kW por estación

## ⚙️ OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

### Operación normal

El sistema opera 24/7 proporcionando comunicación continua entre el Centro de Control y todas las locomotoras, con monitoreo automático de la calidad de señal y disponibilidad.

### Mantenimiento preventivo

* **Diario:** Verificación de estado de equipos y calidad de señal
* **Semanal:** Pruebas de comunicación y respaldo
* **Mensual:** Calibración de equipos y limpieza de antenas
* **Trimestral:** Mantenimiento mayor de equipos y actualización de software

### Respuesta a fallas

1. **Detección automática** de fallas por sistemas de monitoreo
2. **Conmutación automática** a sistemas de respaldo
3. **Notificación inmediata** al personal de mantenimiento
4. **Reparación** según procedimientos establecidos
5. **Verificación** de funcionamiento normal

## 🔗 INTERFACES CON OTROS SISTEMAS

### Diagrama de interfaces

[Control de Tráfico] ←→ [Telecomunicaciones] ←→ [Material Rodante]  
 ↓  
[Centro de Control] ←→ [Telecomunicaciones] ←→ [Señalización]  
 ↓  
[Monitoreo] ←→ [Telecomunicaciones] ←→ [Seguridad]

### Tabla de interfaces críticas

| Sistema | Tipo de Interfaz | Criticidad | Responsable |
| --- | --- | --- | --- |
| Control de Tráfico | Protocolo FFFIS | Alta | EPC Telecomunicaciones |
| Material Rodante | TETRA + GSM-R | Alta | EPC Telecomunicaciones |
| Señalización | Fibra óptica | Media | EPC Telecomunicaciones |
| Seguridad | CCTV + Alarms | Media | EPC Telecomunicaciones |

## 📋 SUPUESTOS TÉCNICOS Y LIMITACIONES

### Supuestos Críticos del Diseño

| Supuesto | Valor Asumido | Impacto si Cambia | Mitigación |
| --- | --- | --- | --- |
| **Radio de cobertura TETRA** | 15 km por estación | Menos estaciones si aumenta | Diseño conservador |
| **Solapamiento requerido** | 20% entre estaciones | Cobertura discontinua si reduce | Redundancia garantizada |
| **Separación cajas fibra** | 300m estándar | Más cajas si reduce | Según normas UIT-T |
| **Altura efectiva torres** | 40m sobre terreno | Menor cobertura si reduce | Factor de seguridad +5m |
| **Disponibilidad TETRA** | 99.5% | Penalizaciones si no cumple | Redundancia N+1 |
| **Disponibilidad GSM-R** | 99.95% | Penalizaciones si no cumple | Doble anillo fibra |

### Limitaciones del Diseño

* **Topografía:** Cobertura puede reducirse en zonas montañosas
* **Interferencias:** Coordinación con ANE requerida para espectro
* **Clima:** Tormentas eléctricas pueden afectar disponibilidad
* **Vandalismo:** Torres remotas susceptibles a daños
* **Mantenimiento:** Acceso limitado en zonas de difícil acceso

### Dependencias Críticas

* **ANE:** Autorización de espectro radioeléctrico
* **FENOCO:** Coordinación de interferencias
* **Proveedores:** Suministro de equipos TETRA/GSM-R
* **Constructoras:** Construcción de torres y fibra óptica
* **Predial:** Adquisición de 37 predios para torres

## ⚠️ RIESGOS Y MITIGACIONES

| Riesgo | Probabilidad | Impacto | Mitigación | Estado |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Interferencias de espectro | Media | Alto | Coordinación con ANE | ✅ Mitigado |
| Fallo de fibra óptica | Baja | Alto | Respaldo satelital | ✅ Mitigado |
| Fallo de torres | Baja | Medio | Redundancia N+1 | ✅ Mitigado |
| Ataques cibernéticos | Baja | Alto | Seguridad en capas | ✅ Mitigado |

## 📋 CUMPLIMIENTO CONTRACTUAL

### Obligaciones clave del contrato

* ✅ **AT1 - Alcance:** Sistemas de telecomunicaciones integrales - Cumplida
* ✅ **AT3 - Especificaciones:** TETRA + GSM-R + Fibra según estándares - Cumplida
* ⏳ **AT5 - Interferencias:** Gestión de interferencias con ANE - En progreso
* ⏳ **AT7 - Predial:** Ubicación de 37 torres colocalizadas - En progreso
* ❌ **AT8 - Operaciones:** Procedimientos operacionales integrados - Pendiente

### Referencias contractuales

* **Apéndice Técnico 1:** Alcance del proyecto - Sistemas de telecomunicaciones
* **Apéndice Técnico 3:** Especificaciones técnicas - TETRA, GSM-R, Fibra óptica
* **Apéndice Técnico 5:** Gestión de interferencias - Coordinación con ANE
* **Apéndice Técnico 7:** Gestión predial - Ubicación de torres

## 📚 DOCUMENTACIÓN DE SOPORTE

### Documentos técnicos disponibles

| Documento | Fase | Versión | Ubicación |
| --- | --- | --- | --- |
| SISTEMA\_02\_Telecomunicaciones\_Master.md | Consolidado | v1.0 | Carpeta X |
| 27\_Sistema\_TETRA\_Integrado\_v5.0.md | Conceptual | v5.0 | III. Ingeniería |
| 28\_Sistema\_FibraOptica\_Integrado\_v5.0.md | Conceptual | v5.0 | III. Ingeniería |
| V.3\_Sistemas\_Comunicacion\_Detalle\_v5.0.md | Detalle | v5.0 | V. Ingeniería |

### Para más información técnica

Los documentos técnicos detallados están disponibles en la Carpeta X del proyecto. Para información específica sobre implementación, contactar al equipo de EPC Telecomunicaciones.

## 📞 CONTACTOS Y RESPONSABLES

| Rol | Responsable | Contacto |
| --- | --- | --- |
| Líder Técnico Telecomunicaciones | [Nombre] | [Email/Tel] |
| Coordinador EPC | Administrador Contractual EPC | [Email/Tel] |
| Responsable ANE | Coordinador Espectro | [Email/Tel] |

## 📊 INDICADORES DE DESEMPEÑO (KPIs)

| Indicador | Meta | Actual | Estado |
| --- | --- | --- | --- |
| Disponibilidad TETRA | 99.5% | 99.2% | 🟡 Mejorable |
| Disponibilidad GSM-R | 99.95% | 99.98% | 🟢 Excelente |
| Cobertura del corredor | 100% | 95% | 🟡 En progreso |
| Tiempo de respuesta | < 500ms | 350ms | 🟢 Excelente |
| Calidad de señal | > 95% | 97% | 🟢 Excelente |

## 🔄 CONTROL DE VERSIONES

| Versión | Fecha | Cambios Principales | Responsable |
| --- | --- | --- | --- |
| 1.0 | Enero 2025 | Versión inicial ejecutiva | Administrador Contractual EPC |

**Documento preparado por:** Administrador Contractual EPC  
**Última actualización:** Enero 2025  
**Próxima revisión:** Febrero 2025  
**Basado en:** SISTEMA\_02\_Telecomunicaciones\_Master.md v1.0