

INTEGRACIÓN Y CONFIGURACIÓN GPS AL SISTEMA DE RADIO PARA EL
METRO DE MEDELLÍN.

CRISTIAN DAVID MARULANDA MONTOYA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2009

INTEGRACIÓN Y CONFIGURACIÓN GPS AL SISTEMA DE RADIO PARA EL
METRO DE MEDELLÍN.

CRISTIAN DAVID MARULANDA MONTOYA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

LEÓN DARÍO GARCÍA VÉLEZ

Ingeniero Informático

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2009

Nota de aceptación

Firma

Nombre

Presidente del jurado

Firma

Nombre

Jurado

Firma

Nombre

Jurado

Medellín, 27 de Octubre de 2009

A mis padres y hermanos...

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

A la empresa Metro de Medellín Ltda., al grupo de trabajo del laboratorio de electrónica y movilización, que aportaron sus conocimientos, espacios e instrumentos durante todo el proceso; al director León Darío García Vélez, por la confianza en la asignación del trabajo, y en especial a Mario Yisbey Gil, por su apoyo, acompañamiento y asesoría en la ejecución del proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	21
OBJETIVO GENERAL	21
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL	22
1.2. DEFINICIÓN	22
1.2.1. <i>Sistema Satelital</i>	22
1.2.2. <i>Sistema de Control Terrestre</i>	23
1.2.3. <i>Sistema del Usuario</i>	23
1.3. FUNCIONAMIENTO DEL GPS	24
1.4. FUENTES DE ERROR.....	26
2. MODEM MSK.....	28
2.1. MODULACIÓN MSK.....	28
2.2. DEMODULADOR MSK.....	29
2.3. SINCRONIZACIÓN DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN	31
2.4. DETECTOR DE PORTADORA	32
3. SISTEMA DE RADIO	33
3.1. AVL ROUTER.....	37
3.2. AVL DATASERVER.....	38
3.3. AVL VISION	39
3.4. AVL CONTROL	40
4. DESCRIPCIÓN OPERACIONAL DEL SISTEMA DE RADIO.....	41
4.1. ZONAS DE RADIO Y CANALES.....	41
4.2. COORDINACIÓN DE LAS ZONAS DE RADIO.....	41
4.3. CONEXIÓN DE LAS ZONAS DE RADIO EN LOS PUESTOS OPERACIONALES LOCALES	
42	
4.4. SELECCIÓN DE LOS NÚMEROS DE CANALES.....	42
4.5. NÚMERO DE LLAMADA	43
4.6. LLAMADA A ALTAVOCES DEL TREN.....	43
4.7. SOLICITUD A UN TREN DE ENVIÓ DE INFORMACIÓN	44

5. CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL SISTEMA DE RADIOS EN TRENES.....	46
5.1. RADIO MOTOROLA PRO7100.....	47
5.2. CARLINK.....	48
5.3. PANEL DE CONTROL.....	49
5.4. ACOPLADOR DIRECCIONAL.....	49
5.5. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	50
5.6. ANTENA OMNIDIRECCIONAL DE UHF Y ANTENA GPS.....	50
6. FUNCIONES DE LOS COMPONENTES.....	51
6.1. EQUIPO DE RADIO PRO7100.....	51
6.2. PANEL DE CONTROL.....	51
6.2.1. Sistema ELA:.....	51
6.2.2. Modo de operación:.....	51
6.2.3. Visualización del número de circulación:.....	52
6.3. UNIDAD CARLINK.....	52
6.3.1. Propósito y Alcance del Sistema de Posicionamiento GPS.....	52
6.3.2. Cambio de canal del equipo PRO7100.....	52
6.3.3. Envío de parámetros a solicitud de PCC.....	53
7. DISEÑO DEL EQUIPO.....	54
7.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	54
7.2. SEÑALES CARLINK.....	57
7.3. COMPONENTES DEL DISEÑO.....	58
7.3.1. Microcontrolador.....	58
7.3.2. Receptor GPS.....	59
7.3.3. RTC.....	61
7.3.4. CMX469A FFSK/MSK Modem.....	62
7.4. DIAGRAMAS DE DISEÑO CARLINK.....	64
7.4.1. Diagrama General de Conexión.....	64
7.4.2. Diagrama Detallado del Carlink.....	64
8. DISEÑO PCB.....	70
9. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	74
9.1. ZONAS DE RADIO.....	74
9.2. ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE PUNTOS GPS.....	75
9.3. COMUNICACIÓN MSK.....	77
9.3.1. Tramas desde PCC.....	78
9.3.2. Tramas Carlink.....	79

9.4.	CONTROL MANUAL Y AUTOMÁTICO Y PTT	81
10.	MICROGRADES	83
10.1.	DEFINICIÓN	83
10.2.	SOFTWARE	83
10.3.	HARDWARE.....	86
10.4.	FILOSOFÍA <i>MICROGRADES</i>	87
10.4.1.	<i>Programación Estructurada</i>	87
10.4.2.	<i>Programación Por Capas</i>	88
10.4.3.	<i>Muestreo y Retención</i>	88
10.4.4.	<i>Tiempo Real</i>	89
10.4.5.	<i>Dominio de la frecuencia</i>	89
10.4.6.	<i>Muestreo Multifrecuencial</i>	91
11.	FIRMWARE	92
11.1.	DIAGRAMA GRAFCET DE LA TAREA NORMAL (100 Hz)	94
11.2.	DIAGRAMA GRAFCET DE LA TAREA RÁPIDA (4000 Hz).....	94
12.	APLICACIÓN RSIC GPS	95
12.1.	RSIC GPS.....	95
12.2.	CONEXIÓN	97
12.3.	CONFIGURACIÓN RTC	98
12.4.	SALVAR PUNTOS GPS.....	99
12.5.	AGREGAR ZONAS	100
12.6.	TERMINAL.....	101
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA	106
	ANEXOS.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Constelación de satélites NAVSTAR.....	22
Figura 2. Código pseudo-aleatorio de tiempo GPS.	25
Figura 3. Posición de un punto con cuatro esferas.....	26
Figura 4. Formas de onda del Modulador MSK.	28
Figura 5. Diagrama de bloques Modulador MSK.	29
Figura 6. Demodulador no coherente MSK.	30
Figura 7. Diagramas de tiempo de la Transmisión y Recepción.	31
Figura 8. Mapa del Sistema Metro.	34
Figura 9. Diagrama General Del Sistema De Radio.	35
Figura 10. Diagrama de bloques del Servidor Central.	37
Figura 11. Captura del software AVL Dataserver.	39
Figura 12. Aplicación AVL Control.....	40
Figura 13. Bandeja de Equipos en trenes.	46
Figura 14. Radio PRO 7100.	48
Figura 15. Diagrama de bloques de entradas y salidas de los equipos.	54
Figura 16. Cable Serial.	55
Figura 17. Cable Radio-Carlink.	56
Figura 18. Herramienta con Receptor GPS de Tyco.	59
Figura 19. Diagrama de Bloques CMX469A.....	62
Figura 20. Diagrama de Bloques General del Carlink.....	64
Figura 21. Diagrama detallado de conexión Carlink.	65
Figura 22. Conexión Básica del Microcontrolador.	66
Figura 23. Conexión de la fuente del Carlink.....	67
Figura 24. Conexión Modem MSK.	68
Figura 25. Conexión del RTC.....	69
Figura 26. Distribución de componentes PCB Carlink.	70
Figura 27. Distribución de Etapas PCB Carlink.	71

Figura 28. Esquema para un sistema de tierra Multipunto.	72
Figura 29. Conexiones PCB.....	73
Figura 30. Ubicación Sistema Metro con respecto al sistema de coordenadas. ...	76
Figura 31. Solicitud Parámetros AVL Router.	78
Figura 32. Software Microgrades.	84
Figura 33. Dispositivos Microgrades.	85
Figura 34. Programador de Campo.	86
Figura 35. Estructura Básica del Firmware desarrollado en Microgrades.	87
Figura 36. Estructura del Sistema Operativo de Microgrades.....	88
Figura 37. Método convencional y Método Microgrades.	90
Figura 38. Diagrama Grafcet de la Tarea Normal.....	94
Figura 39. Diagrama Grafcet de la Tarea Rápida.	94
Figura 40. Configuración del puerto RSIC GPS.	96
Figura 41. Pestaña de Conexión del RSIC GPS.	97
Figura 42. Pestaña de Configuración RTC del RSIC GPS.	98
Figura 43. Pestaña de Salvar Puntos GPS del RSIC GPS.	99
Figura 44. Pestaña de Agregar Zonas GPS del RSIC GPS.	100
Figura 45. Pestaña de Terminal GPS del RSIC GPS	101
Figura 46. Pestaña de Terminal con la opción GPS Tyco del RSIC GPS.....	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tonos de frecuencia para 1200/2400 bps MSK modem	28
Tabla 2. Distribución pines Conector DB15 de Alimentación.....	55
Tabla 3. Distribución pines Conector DB15 <i>Carlink</i>	56
Tabla 4. Zonas de Radio.	74
Tabla 5. Medidas GPS Zonas de Radio.	75

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Anteproyecto.....	109
ANEXO B. Artículo Publicable.....	134
ANEXO C. Zonas de Radio (Líneas Metro).....	145
ANEXO D. Resumen del Diario de Actividades.....	147

GLOSARIO

ALIAS DATABASE MANAGER: *Software* que administra la base de datos del *software Centracom Gold Elite* del Sistema de Radiocomunicaciones del Metro de Medellín.

ALMANAC: Registro del GPS que contiene datos de estado de los satélites, fecha y hora.

AVL CENTRO DE CONTROL: *Software* desarrollado por AVL de Colombia para hacer seguimiento a los trenes.

C@RLINK: Módem desarrollado por AVL de Colombia para procesar datos al interior del tren y recibir la ubicación geográfica a través del sistema GPS.

CENTRACOM GOLD ELITE: *Software* desarrollado por Motorola para realizar comunicaciones con los conductores, operadores de estación y demás personal del sistema.

EFEMÉRIDES: Para aplicaciones de posicionamiento global, se refiere a los valores de las posiciones orbitales en las que se pueden encontrar los satélites.

ELA OFF: Sistemas de altavoces del tren deshabilitados.

ELA ON: Sistemas de altavoces del tren habilitados.

FRAMEWORK: Estructura de soporte definida en la cual otro proyecto de software puede ser organizado y desarrollado.

FIRMWARE: Bloque de instrucciones encargado de establecer la lógica que controla los circuitos electrónicos.

GPS: Sistema Global de Navegación por Satélite, que permite determinar la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una nave en cualquier parte del mundo.

INTERESTACIÓN: Tramo de vía comprendido entre dos estaciones.

MOVILIZACIÓN: Área del Metro de Medellín, encargada del mantenimiento de los trenes.

NÚMERO DE CIRCULACIÓN: cifra que se le asigna a los trenes de acuerdo a un horario para identificarlos en el Sistema.

OPERADOR DE LÍNEA: Persona encargada de comandar y dirigir el correcto funcionamiento de cada una de las líneas dispuestas para el control y la gestión del sistema.

PANEL DE CONTROL: Dispositivo controlado por un PIC16F874 que tiene como función la intercomunicación entre los distintos equipos del tren.

PATIOS DE BELLO: Planta ubicada en el municipio de bello para el estacionamiento de los trenes, con instalaciones para mantenimiento y las instalaciones ferroviarias.

PUESTO CENTRAL DE CONTROL: Edificio ubicado cerca de la estación San Antonio, donde se encuentran las computadoras centrales de supervisión y monitoreo, tanto de energía, comunicación, tablero panorámico, entre los equipos que permiten el control de la operación.

RADIO MOTOROLA PRO7100: Equipo del Sistema de Radio Móvil del metro de Medellín, que permite el envío de mensajes de voz hacia y desde otros equipos de radio del sistema.

SISTEMA ELA: Sistema de altavoces del tren.

TREN: Serie de coches acoplados entre sí, remolcados por uno o varios coches de mando o coches motores. Una unidad es considerada también un tren.

UNIDAD: Vehículo básico de pasajeros compuesto por un número determinado de coches, donde algunos de ellos son motores y otros son remolques. La unidad cuenta en ambos extremos de su conformación con cabina de conducción y enganches automáticos. El término unidad también se entiende como vehículo. En la flota actual del Metro de Medellín una unidad está compuesta por tres (3) coches, dos coches motores en los extremos y un coche remolque intermedio.

SÍMBOLOS Y VARIABLES

ACE: Acevedo

bps: Baudios

BEO: Bello

CAT: Aguacatala

CAR: Caribe

HOS: Hospital

ITA: Itagüí

JAV: San Javier

m: Metros

MAD: Madera

MSK: *Minimum Shift Keying.*

NIQ: Niquía

ns: Nanosegundo

kB: Kilobyte

PCC: Puesto Central de Control

PBE: Patios de Bello

POB: Poblado

PRA: Prado

SAB: San Antonio B

SAM: Suramericana

TRC: Torre de Control

TRI: Tricentenario

RESUMEN

Se describe el funcionamiento del Sistema de Radio del Metro de Medellín, específicamente de la configuración en los trenes, y el papel que juega allí el equipo *C@rlink*, al que se le aplica ingeniería inversa, para obtener un prototipo que cumpla con las tareas de forma similar, ajustando el prototipo a las necesidades que actualmente tiene la empresa, complementándolo con una aplicación con la que el usuario interactúe para conocer el estado y configuración. Se describe todo el proceso que se llevo a cabo para el desarrollo del prototipo, tanto en el *hardware*, en el *Firmware* y el aplicativo necesario para poder ser adaptado a un sistema ya establecido con protocolos definidos de comunicación. El prototipo desarrollado, tiene dentro de sus componentes principales el modem MSK (Minimum Shift Keying), e interactúa según lo programado en el *Firmware* descargado en el Microcontrolador, utilizando la infraestructura de comunicaciones para recibir y enviar datos vía radio, además con funciones como la de adquirir, almacenar y procesar información geográfica del receptor GPS, para establecer la frecuencia de operación a la que debe trabajar el radio de comunicaciones, garantizando en todo momento las comunicaciones entre los móviles y el Puesto de control.

PALABRAS CLAVE: CARLINK, ELA, GPS, MICROGRADES, MODEM MSK, PANEL DE CONTROL, RADIO MOTOROLA PRO7100.

INTRODUCCIÓN

En el Metro de Medellín las comunicaciones operativas son básicas para garantizar la seguridad en la ejecución de todos los procedimientos que la empresa lleva a cabo. Por lo que es necesario garantizar a todas las partes involucradas la disponibilidad de todos los sistemas de comunicaciones.

Uno de estos sistemas es el Radio, que desarrolla un papel muy importante en la comunicación de los interlocutores fijos en PCC (Puesto Central de Control) o en TRC (Torre de Control), con interlocutores móviles en los vehículos (trenes y vehículos auxiliares), o cuando sea requerido comunicar algo desde PCC a los altavoces del tren. Las zonas y canales de operación ya están establecidos, y los interlocutores móviles deben estar sintonizados en el canal correspondiente a la zona.

En general el sistema de radiocomunicaciones atiende necesidades de comunicaciones operativas del servicio comercial, las necesidades de comunicaciones de las áreas encargadas del mantenimiento y de la seguridad del Sistema Metro y algunas necesidades de orden administrativo.

Los equipos encargados del control del sistema de radio se encuentran distribuidos estratégicamente por toda la línea comercial, permitiendo la comunicación permanente con los trenes y demás personales, con un cubrimiento total del sistema. El Sistema de Radiocomunicaciones trabaja con un *software* llamado *Centracom Elite*, que permite al OPL (Operador de Línea) establecer comunicaciones con la unidad que requiera, con solo referenciar el ID del radio con un alias, que equivale al número de la unidad y la cabina respectiva.

Cada unidad tiene dos cabinas y en ambas, está instalado un equipo de radio, un *C@rlink* y un panel de control, que forman la configuración básica del sistema de

radio en trenes. El radio se encarga directamente de la comunicación, el *C@rlink* es la interfaz del radio con el panel de control, además de encargarse del cambio automático de canales del radio, de la recepción de mensajes de audio y del envío de parámetros del tren; y el panel de control se encarga de la conmutación de los altavoces del tren y mediante un *display* muestra el número de circulación de la unidad.

Los módulos *C@rlink* fueron desarrollados por la empresa AVL de Colombia y los suministraron al Metro de Medellín. Actualmente la empresa Metro de Medellín no tiene repuestos de este módulo, y si se presenta alguna falla no tendrían repuestos. La empresa AVL de Colombia ya no existe, surgiendo la necesidad de desarrollar un equipo que cumpla todas las funciones y pueda ser adaptado al sistema actual interactuando con el radio y el panel de control.

En este informe se muestra el estudio y análisis del sistema actual, partiendo de los requisitos necesarios para realizar la integración con los demás equipos de la configuración. Se describe todo el proceso de construcción, revisión de funcionalidades y las interfaces con los distintos sistemas involucrados en el desarrollo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el módulo que tome acciones de control de acuerdo a su interacción con el GPS, el radio de comunicaciones y el panel de control, para cumplir con las funciones del cambio automático de canales, la recepción de mensajes de audio y el envío de parámetros del tren.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el equipo que integre el radio de comunicaciones para la transmisión de datos y el GPS para determinar la ubicación geográfica del tren.
- Desarrollar un programa que complemente al equipo, permitiendo que el usuario configure sus zonas geográficas.
- Configurar el equipo de tal forma que pueda comunicar los altavoces del tren con la señal de audio recibida desde el Centro de Control, utilizando como interfaz el panel de control.
- Configurar el equipo para que responda a la petición de parámetros del tren, enviando información de hora, posición, fecha y velocidad del tren a PCC.
- Estudiar el entorno de desarrollo *Microgrades*, que permitirá el proceso de desarrollo e implementación del *Firmware* encargado de establecer la lógica y control del equipo.

1. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

1.2. Definición

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema compuesto por una red de 24 satélites, puestos en órbita por el departamento de defensa de los estados unidos, que permiten determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una nave, con una precisión hasta de centímetros, usando GPS diferencial, aunque lo habitual son unos pocos metros¹.

1.2.1. Sistema Satelital

El sistema satelital se basa en una constelación de 24 satélites, donde 21 satélites están activos y los otros 3 son de reserva, por si se presentan fallas. Los satélites orbitan a la tierra a una altura de 20200 Km, necesitando 11h58m para describir una órbita completa, dando la vuelta a la tierra aproximadamente dos veces al día.

Figura 1. Constelación de satélites NAVSTAR.



Fuente: TECNOPROJECT [en línea] <Disponible en:

<http://www.tecnoprojectltda.com/QUEESGPS.htm>> [consulta: 20 Ago. 2009]

¹ WIKIMEDIA FOUNDATION, INC., Sistema de Posicionamiento Global. [en línea] <Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global> [Consulta: 20 Ago. 2009]

Como se aprecia en la imagen la configuración consta de 6 planos orbitales con 4 satélites cada uno, con el fin de que por lo menos puedan ser visibles 4 satélites desde cualquier parte del mundo, que es la mínima cantidad que necesita el Receptor GPS para fijar una posición.

1.2.2. Sistema de Control Terrestre

El sistema de control consiste de cinco estaciones de monitoreo localizadas en Hawái, Kwajalein, Isla Ascensión, Diego García y Colorado Springs; tres estaciones terrenas en Isla Ascensión, Diego García y Kwajalein, y una Estación Maestra de Control (MCS) localizada en la base aérea de Falcón Colorado, la cual mantiene los satélites en posición orbital y su respectiva regulación de tiempo de cada satélite. Las estaciones de monitoreo rastrean todos los satélites que se encuentran a la vista, acumulando la información monitoreada. Esta información es procesada en la MCS para determinar las órbitas de los satélites y para actualizar cada mensaje de navegación de cada satélite. Una vez actualizada esta información es transmitida a cada satélite desde las estaciones terrenas².

1.2.3. Sistema del Usuario

Son los receptores GPS que indican la posición, altitud, velocidad y tiempo preciso al usuario desde cualquier parte del mundo las 24 horas del día.

² MARTÍNEZ, Evelio. Sistema Mundial de Localización por Satélite (GPS). [en Línea] En: Revista RED, (Ene.1998). <Disponible en: [<http://www.eveliux.com/mx/sistema-mundial-de-localizacion-por-satelite-gps.php>]> [Consulta: 20 Ago.2009]

El Receptor GPS recibe 3 señales de información diferentes, un código pseudo-aleatorio, efemérides y *almanac*. El código pseudo-aleatorio es simplemente un identificador para saber cual satélite está transmitiendo información. Efemérides le dice al receptor GPS donde debería estar cada satélite a cualquier hora durante el día. Cada satélite transmite este tipo de señal señalando su información de órbita y las órbitas de los otros satélites. Los datos *almanac* contienen importante información sobre el estado del satélite, fecha y hora. Es esencial para determinar una posición³.

1.3. Funcionamiento del GPS

El sistema GPS funciona determinando cuánto tiempo tarda una señal de radio transmitida de un satélite en llegar al receptor en tierra, con este tiempo se calcula la distancia entre el satélite y la antena del receptor.

Se sabe que las ondas de radio viajan aproximadamente a la velocidad de la luz, entonces el receptor puede determinar la distancia entre él y el satélite, con la ecuación:

$$d = v \times t \quad (1)$$

Donde:

d = distancia entre el satélite y el receptor (metros)

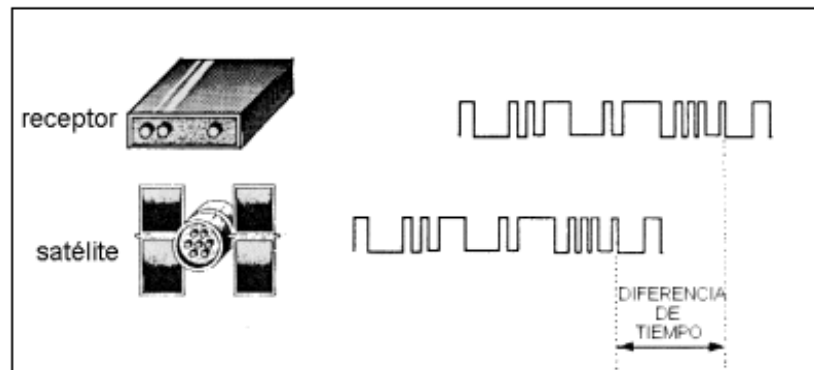
v = velocidad (3×10^8 m/s)

t = tiempo de propagación (segundos)

³ Funcionamiento del GPS. [en línea] <Disponible en: <http://www.ordenadores-y-portatiles.com/gps.html>>[Consulta: 20 Ago. 2009]

Para conocer cuando partió la señal del satélite, lo primero que hace el receptor es sincronizar el reloj con los satélites, de manera que generen exactamente la misma hora. Al recibir la señal desde un satélite determinado, esta es comparada con la señal generada en el receptor para calcular el desfase. La diferencia de fase será igual al tiempo que ha empleado la señal en llegar hasta el receptor.

Figura 2. Código pseudo-aleatorio de tiempo GPS.

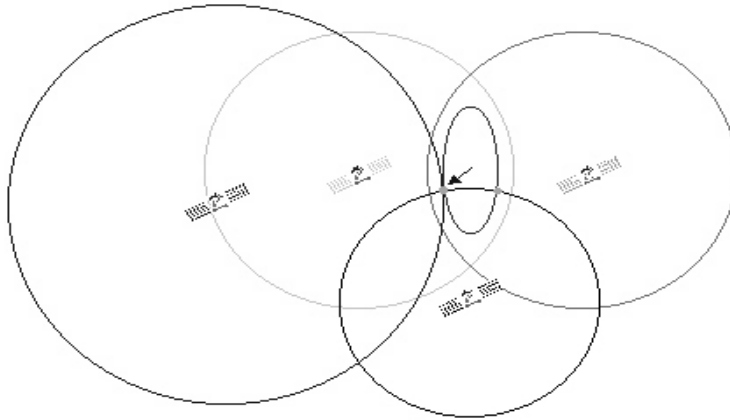


Fuente: Posicionamiento y Navegación Global mediante Satélites [en línea] <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos19/navegacion-global/navegacion-global.shtml>> [Consulta: 20 Ag. de 2009]

Como se mencionó anteriormente, cada satélite transmite 3 tipos de señales y dentro de estas se encuentra el código pseudo-aleatorio, generado cada milisegundo, igualmente ocurre con el receptor, por esto es que se les puede comparar fácilmente.

Por último para que el receptor GPS entregue una posición válida debe recibir información como mínimo de cuatro satélites, y así determinar una posición 3-D exacta (latitud, longitud y altitud).

Figura 3. Posición de un punto con cuatro esferas.



Como se observa en la figura midiendo la distancia desde el receptor a cuatro satélites se determina la posición del punto.

1.4. Fuentes de error.

El receptor GPS no está exento de fuentes de error en las que se pueden clasificar errores en los satélites, errores atmosféricos, errores multitrayectoria, errores en el receptor y disponibilidad selectiva (SA), que es una de las principales limitaciones, debido a la dependencia que tiene el sistema con el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, que pueden eliminar por completo el servicio para los civiles.

- *Errores en los satélites:* Causados por errores en el reloj, errores en la posición difundida y errores orbitales en un satélite.
- *Errores atmosféricos:* Se generan debido a que la propagación de la señal radio a través de la troposfera e ionosfera provoca retardos de la señal.
- *Errores multitrayectoria:* Se producen cuando la señal que llega a la antena del GPS no es directa, sino reflejada, debido a la obstrucción de edificios, árboles, montañas, etcétera, por lo que es recomendable que la antena este

ubicada a una altura significativa para evitar reflexiones.

- *Errores en el receptor:* Provocados por el ruido electrónico generado por fuentes externas e internas al receptor o por errores en el reloj del mismo.
- *Disponibilidad Selectiva:* Error intencionado aportado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para evitar que usuarios no autorizados dispongan de un posicionamiento muy preciso y utilicen esta tecnología en su contra.

2. MODEM MSK

2.1. Modulación MSK

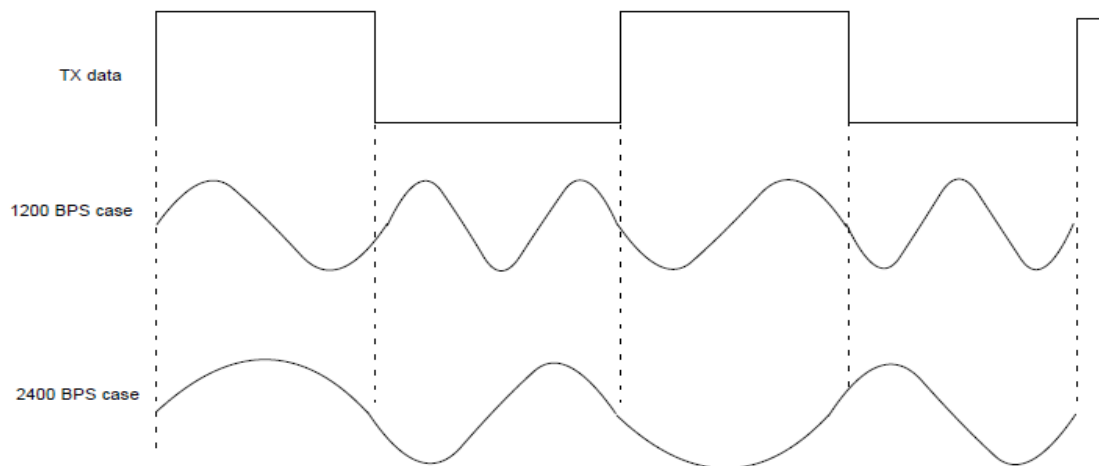
Dependiendo de la tasa de bits seleccionada y el dato digital de entrada, el modulador puede generar frecuencias de 1200, 1800 o 2400 Hz.

Tabla 1. Tonos de frecuencia para 1200/2400 bps MSK modem

Baud rate (BPS)	TX data in	MSK frecuencia
1200	1	1200 Hz
1200	0	1800 Hz
2400	1	2400 Hz
2400	0	1200 Hz

El modulador genera tonos de fase continua y con cambios de frecuencia cuando hay un cruce por cero.

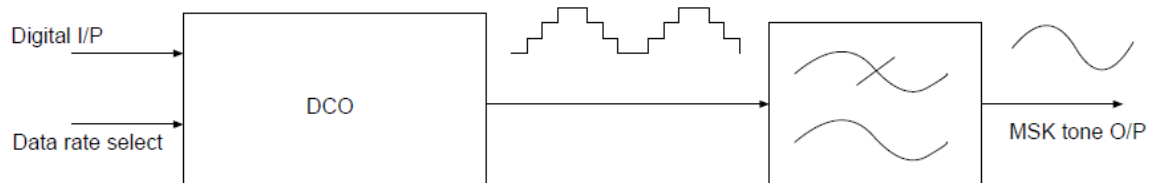
Figura 4. Formas de onda del Modulador MSK.



Fuente: MX.com, INC. Mixed Signal ICs, *Application*. MSK and its Application to Wireless Data Transmission, 1997. p. 8.

El modulador consiste de un oscilador de control digital y filtro pasabajos. El índice de modulación es de 0.5 y la frecuencia de la portadora es 1500 Hz for 1200 baudios y 1800 Hz para 2400 baudios.

Figura 5. Diagrama de bloques Modulador MSK.

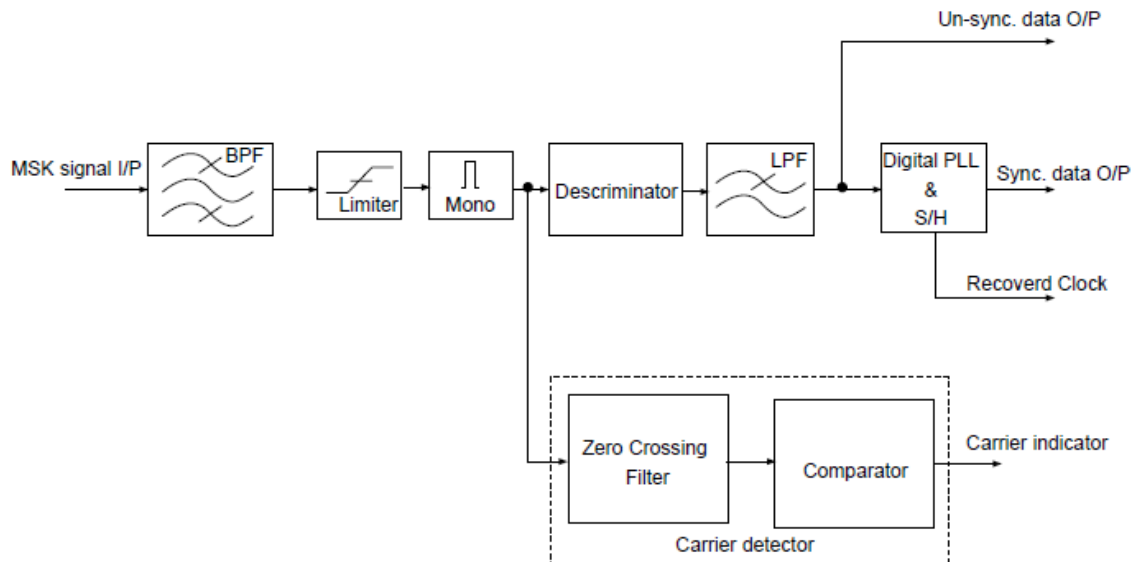


Fuente: MX.com, INC. Mixed Signal ICs, *Application*. MSK and its Application to Wireless Data Transmission, 1997. p. 8.

2.2. Demodulador MSK

El proceso de demodulación convierte la señal MSK senoidal a digital (1 y 0's). El diagrama de bloques que se muestra en la siguiente figura, consiste de un filtro pasa banda. A la salida del filtro se digitaliza la señal MSK, con la mitad de la onda positiva en un pulso alto y la otra mitad en un pulso bajo. El bloque de monoestable es un indicador de cruce por cero, que produce un pulso cada vez que la señal de entrada cambia de polaridad. Luego el discriminador de frecuencias diferencia entre los dos tonos MSK basado en la frecuencia de la señal de cruce por cero. Esta detección no es coherente porque el receptor no está sincronizado en fase ni en tiempo con el transmisor.

Figura 6. Demodulador no coherente MSK.



Fuente: MX.com, INC. Mixed Signal ICs, *Application*. MSK and its Application to Wireless Data Transmission, 1997. p. 9.

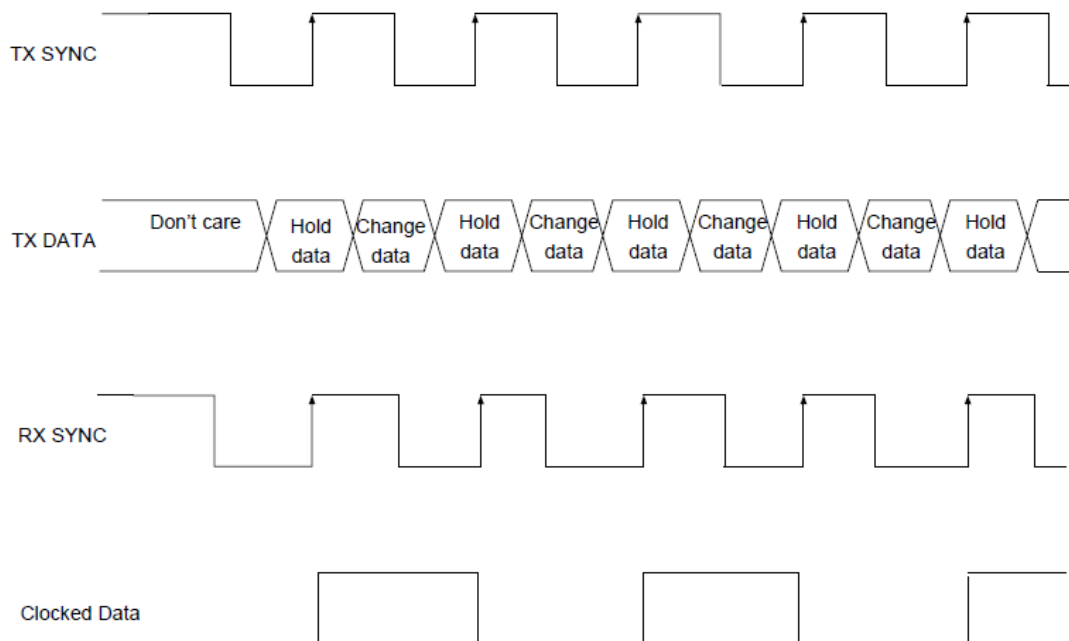
La salida del detector de portadora indica si la señal MSK se está recibiendo. El detector de portadora trabaja fuera de la indicación de señal de cruce por cero. El filtro de cruce por cero discrimina entre buenos y malos sucesos de cruces por cero y cuenta los malos cruces sobre un periodo predefinido. El comparador relaciona el contador con un límite preestablecido para tomar una decisión en la salida del detector de portadora.

El bloqueo de fase genera un reloj de referencia que corre según la tasa de baudios seleccionada. La salida del dato sin reloj es muestreado cada flanco de bajada del reloj proporcionando la salida de los datos sincronizados. El periodo de reloj sincrónico es ajustado cada vez por ciclo si es necesario para alinear el flanco de bajada del reloj con la mitad de la salida de los datos sin sincronizar.

2.3. Sincronización de transmisión y Recepción

El modulador proporciona un reloj de referencia al usuario, este reloj necesita ser usado para brindar los datos de entrada digitales al dispositivo.

Figura 7. Diagramas de tiempo de la Transmisión y Recepción.



Fuente: MX.com, INC. Mixed Signal ICs, *Application*. MSK and its Application to Wireless Data Transmission, 1997. p. 10.

El demodulador entrega el reloj y los datos son referenciados a este. Los dos reloj pueden ser usados para habilitar la comunicación sincrónica entre el modem y el equipo que proporciona los datos.

2.4. Detector de Portadora

El detector de portadora es una importante característica del demodulador. Este detector indica si se debe despertar o apagar determinada circuitería del sistema y esto reduce el consumo de energía. El tiempo de respuesta del detector es controlable por el usuario a través de una entrada externa, con el fin de ajustar la sensibilidad para el tiempo de respuesta, ya que la rápida respuesta del detector de portadora puede ser falsa al presentarse ruido y si ocurre esto el tiempo de respuesta está comprometido y debe reducirse.

3. SISTEMA DE RADIO

El sistema de radiocomunicaciones se encarga de la comunicación de los conductores y demás operadores del Metro. Para la realización y recepción de llamadas a los trenes, el sistema de radio utiliza un software llamado *Centracom Elite*, donde el OPL puede identificar el tren con el que se va a comunicar o de quien recibió llamada.

El Metro posee 8 canales de radio operativos, uno de datos y 5 no operativos. De los 8 canales operativos, 2 se utilizan para comunicación con la parte Norte de la línea A, 2 para la parte Sur de la línea A, 1 para Línea B, 1 para la entrada y salida de trenes de Patios Bello, 1 en los momentos que se estén realizando maniobras como acoples y desacoples y los demás se utilizan en las instalaciones con tecnología tipo cable aéreo.

De los 5 canales no operativos, uno es utilizado como canal General, otro para comunicación con el Metrocable y los tres restantes para comunicarse con las áreas de Infraestructura, Incidencias y Movilización. El canal de datos es utilizado para el envío de datos desde los trenes.

Figura 8. Mapa del Sistema Metro.



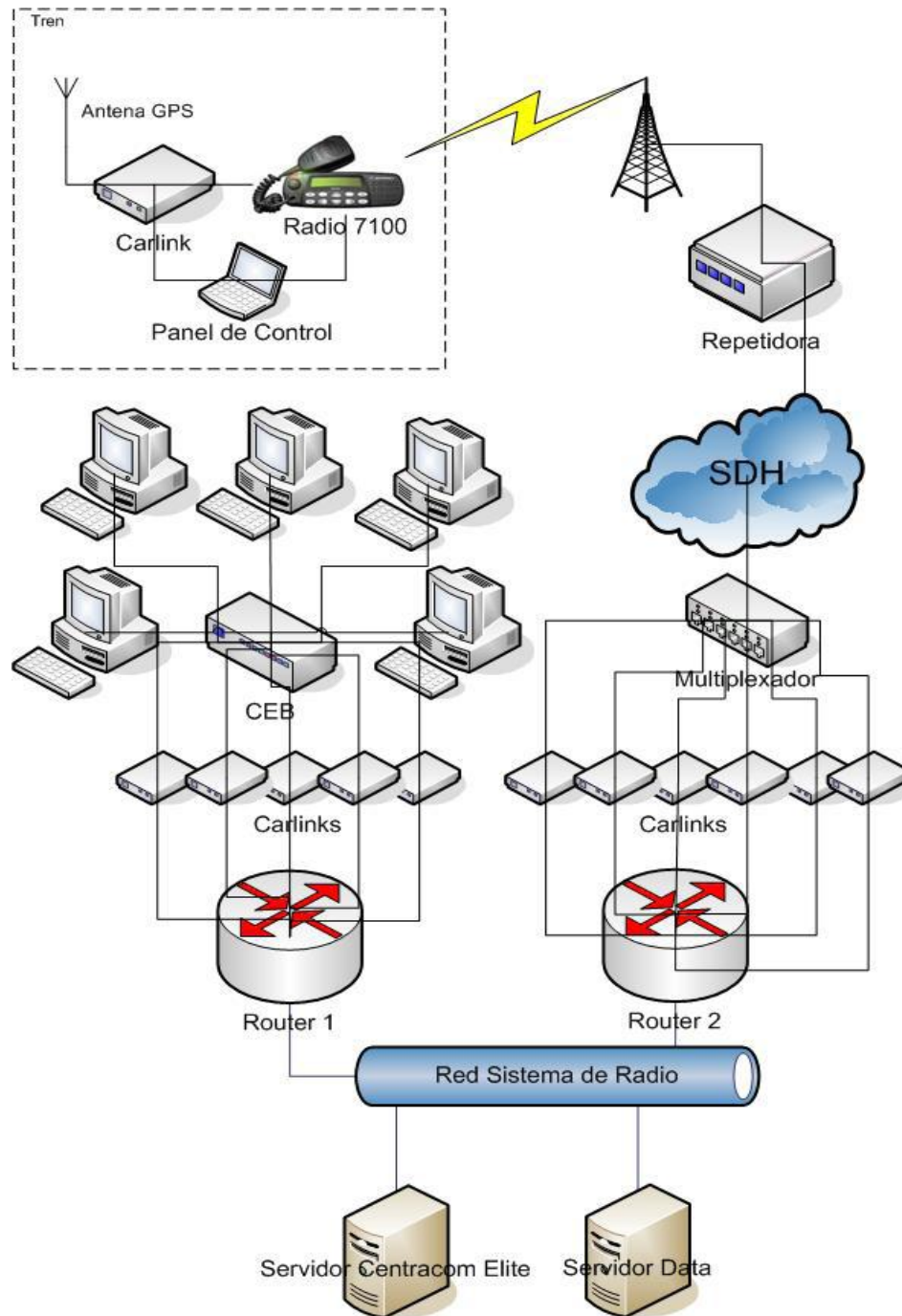
Fuente: METRO DE MEDELLÍN. Mapa del Sistema [en línea] <Disponible en: <http://www.metrodemedellin.gov.co/images/felipe/MAPAserVICIOS.jpg>> [consulta: 25 Ago. 2009]

El Sistema de radiocomunicaciones posee además otro sistema que permite la ubicación geográfica de los trenes, este sistema está compuesto por un servidor central y el equipo *C@rlink*, que va instalado en los trenes. El Servidor central tiene como función recibir los datos enviados por el *C@rlink* y almacenarlos en la base de datos en SQL Server y enviar 3 comandos predefinidos:

- ELA ON: Para enviar mensajes de audio desde PCC a los trenes.
- ELA OFF: Para terminar el envío de mensajes de audio.
- Parámetros: Para obtener los parámetros de posición y potencia del radio de una unidad determinada.

La siguiente figura muestra un diagrama general de los equipos que componen todo el sistema de radio.

Figura 9. Diagrama General Del Sistema De Radio.



Fuente: GARCÍA MEJÍA, Jaime Andrés. Integración de Sistema de Comunicaciones con Sistema de Gestión de Tráfico para los Trenes en el Metro de Medellín Ltda. Medellín 2007. p.35. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica.

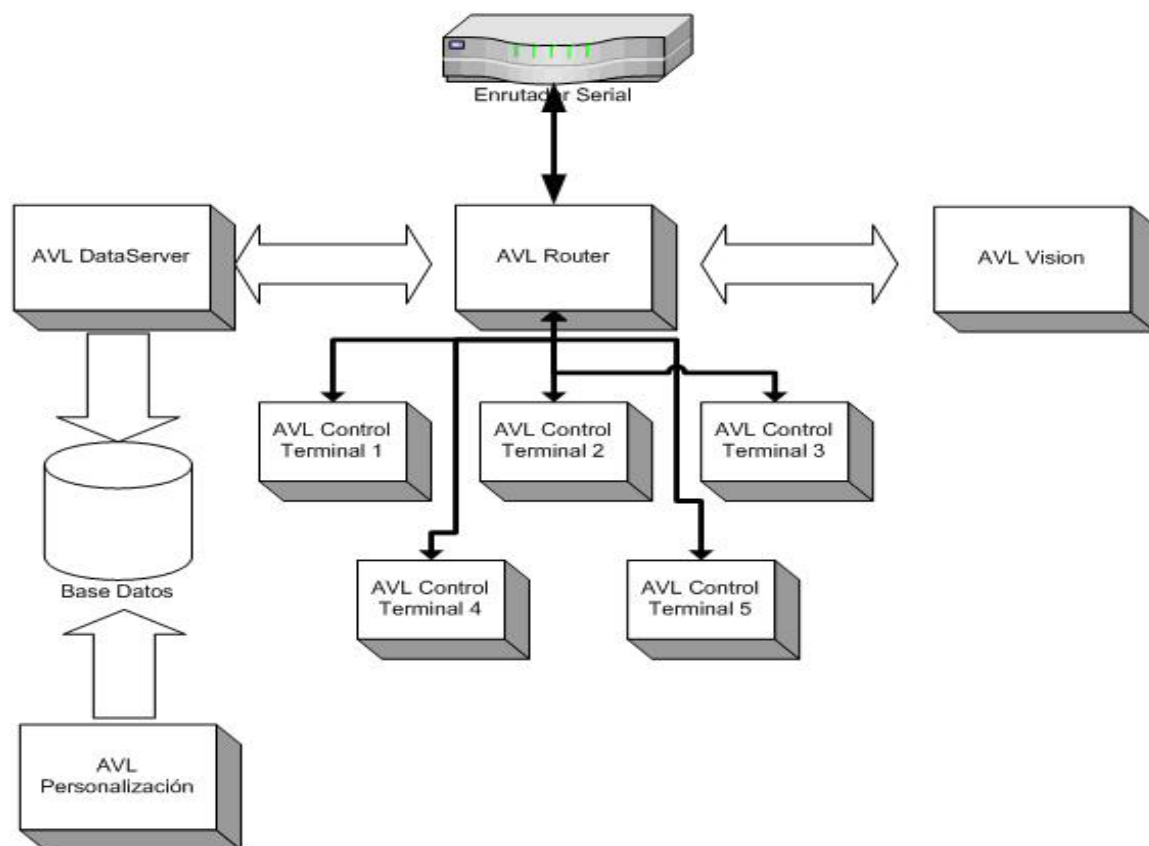
Donde el Servidor *Centracom Elite* se encarga del control del Sistema de Radio y el Servidor *Data* del Sistema Central de Ubicación Geográfica. Los mensajes que van hacia el tren son enviados al *router 2*, un *router* con conexión serial hacia 6 *C@rlinks*, que envían los datos a las 6 repetidoras del Metro, los mensajes pasan a un multiplexador donde se unen en una sola línea y de ahí viajan por la red SDH llegando hasta las repetidoras, de donde el mensaje es enviado a los trenes.

El Servidor Central se compone de 5 módulos de software:

- AVL ROUTER
- AVL DATA SERVER
- AVL VISION
- AVL CONTROL
- AVL PERSONALIZACION

A continuación se muestra el diagrama de bloques y las aplicaciones con las que interactúa el *C@rlink*.

Figura 10. Diagrama de bloques del Servidor Central.



Fuente: A.V.L DE COLOMBIA. Manual de Usuario del Software AVL. Bogotá: A.V.L de Colombia, 2002. p. 3

3.1. AVL Router

Sistema multiproceso encargado del manejo de las comunicaciones entre las unidades *C@rlink* y el resto de módulos de software como *AVL DataServer*, *AVL Vision* y *AVL Control*. Este módulo es la interfaz entre la información enviada y recibida desde y hacia las unidades remotas que pueden ser trenes o repetidoras⁴.

⁴ VISION & CONTROL - MANUAL DEL USUARIO. Desarrollado para el Metro de Medellín, 2002. p. 1

3.2. AVL Dataserver

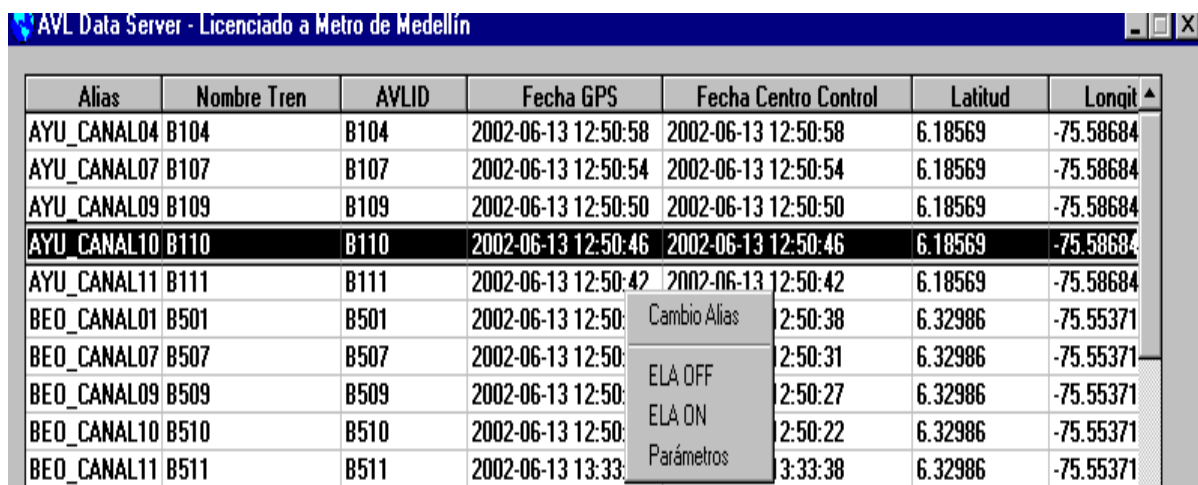
Se encarga de almacenar la información entrante de los trenes y repetidoras en una base de datos. Del mismo modo visualiza en forma tabular los siguientes campos:

- Alias: Es el nombre que se le asigna a un tren
- Número de tren: Número asignado al tren
- AVLID: Identificador del equipo *C@rlink*
- Fecha GPS : Es la fecha del GPS de la información entrante
- Fecha Centro Control: Es la fecha y hora del Servidor del Centro de Control a la cual llegó la información. Normalmente la fecha de GPS y del Centro de Control son similares.
- Latitud. Coordenada Y en el sistema geodésico
- Longitud: Coordenada X en el sistema geodésico
- Velocidad: Velocidad del tren en Km/h
- Dirección: No aplica
- Ignición: No aplica
- GPS: Estado del GPS. Los estados válidos son 2D y 3D. Los no válidos son Sin Posición o Sin antena.
- Evento. Número del evento que reporta el equipo *C@rlink*
- Canal: Canal del radio por el que está reportando el *C@rlink*.
- Audio. Estado del sistema de audio en el tren. Los valores posible son : ELA ON y ELA OFF
- Modo: Modo de operación del audio. Puede ser Manual o Automático.
- Track: Es el número de satélites que está recibiendo el GPS.
- RSSI: valor de Potencia RSSI
- Potencia Directa: Valor en Watt
- Potencia Reflejada: Valor en Watts

- Potencia Combinador: Valor en Watts
- Batería: Nivel del voltaje de batería principal que alimenta el equipo C@rlink
- Entradas: No aplica
- Salidas: No aplica

Para el envío de mensajes con este módulo se pueden pedir parámetros a los trenes o repetidoras. Del mismo modo se puede enviar mensajes ELA ON y ELA OFF a los trenes.

Figura 11. Captura del software AVL Dataserver.



The screenshot shows the 'AVL Data Server - Licenciado a Metro de Medellín' window. It contains a table with the following columns: Alias, Nombre Tren, AVLID, Fecha GPS, Fecha Centro Control, Latitud, and Longit. The table lists various train aliases and their corresponding IDs and coordinates. A context menu is open over the table, showing options: 'Cambio Alias', 'ELA OFF', 'ELA ON', and 'Parámetros'.

Alias	Nombre Tren	AVLID	Fecha GPS	Fecha Centro Control	Latitud	Longit
AYU_CANAL04	B104	B104	2002-06-13 12:50:58	2002-06-13 12:50:58	6.18569	-75.58684
AYU_CANAL07	B107	B107	2002-06-13 12:50:54	2002-06-13 12:50:54	6.18569	-75.58684
AYU_CANAL09	B109	B109	2002-06-13 12:50:50	2002-06-13 12:50:50	6.18569	-75.58684
AYU_CANAL10	B110	B110	2002-06-13 12:50:46	2002-06-13 12:50:46	6.18569	-75.58684
AYU_CANAL11	B111	B111	2002-06-13 12:50:42	2002-06-13 12:50:42	6.18569	-75.58684
BEO_CANAL01	B501	B501	2002-06-13 12:50:38	2002-06-13 12:50:38	6.32986	-75.55371
BEO_CANAL07	B507	B507	2002-06-13 12:50:31	2002-06-13 12:50:31	6.32986	-75.55371
BEO_CANAL09	B509	B509	2002-06-13 12:50:27	2002-06-13 12:50:27	6.32986	-75.55371
BEO_CANAL10	B510	B510	2002-06-13 12:50:22	2002-06-13 12:50:22	6.32986	-75.55371
BEO_CANAL11	B511	B511	2002-06-13 13:33:38	2002-06-13 13:33:38	6.32986	-75.55371

Fuente: VISION & CONTROL - MANUAL DEL USUARIO p.6.

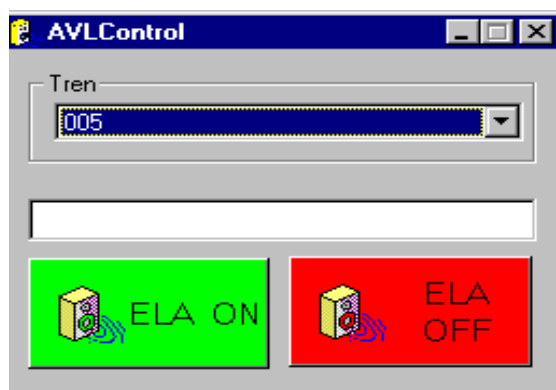
3.3. AVL Vision

Esta aplicación permite la visualización grafica de los móviles, pero actualmente no es utilizada ya que cuentan con otro software que se ajusta más a las necesidades del metro para el control y monitoreo de todo el sistema.

3.4. AVL Control

La aplicación de *AVL Control* permite al operador realizar una comunicación de voz a cualquier tren que se encuentren registrado en el sistema.

Figura 12. Aplicación AVL Control.



Fuente: VISION & CONTROL - MANUAL DEL USUARIO p.8.

Con ELA ON el operador de la central adquiere el control de la comunicación interna del tren seleccionado y ELA OFF, permite al conductor del móvil retomar el control de la comunicación dentro del Tren.

4. DESCRIPCIÓN OPERACIONAL DEL SISTEMA DE RADIO

4.1. Zonas de radio y canales

Las instalaciones ferroviarias se dividen en diferentes zonas de radio que equivalen aproximadamente a los sectores de los Operadores de Línea o del Operador de Patio. A las diferentes zonas de radio se han asignado diferentes canales. Para poder efectuar conversaciones por el sistema de radio, en los equipos de radio hay que sintonizar el canal que corresponda a la zona del interlocutor móvil⁵.

El *C@rlink* se encarga de verificar en todo momento que el canal de radio está ubicado correctamente en la zona respectiva y en condiciones operativas para que así las comunicaciones sean efectivas, a no ser que el conductor por algún motivo deba encargarse de la comunicación, entonces puede poner el *C@rlink* en modo manual.

4.2. Coordinación de las zonas de radio

Las instalaciones ferroviarias se dividen en las zonas de radio siguientes:

- Patio de Bello, entrada y salida de trenes, comunicación con Vehículos auxiliares y con personal de mantenimiento en el canal 0, y Servicio de Maniobras en el canal 8.
- Línea A-Norte: canales 1 y 2
- Línea A-Sur: canales 3 y 4
- Línea B: canal 5
- Vía de Enlace: canales 2 y 5

⁵ Metro de Medellín LTDA. Manual de Servicio de Transporte. MST-110 p. 17.

4.3. Conexión de las zonas de radio en los puestos operacionales locales

En los puestos operacionales locales, que interactúan con el *C@rlink* tienen que estar conectados permanentemente:

- En PCC
 - Operador de Línea A-Norte, los canales 1 y 2
 - Operador de Línea A-Sur, los canales 3 y 4
 - Operador de Línea B, el canal 5
- En la Torre de Control en Patio de Bello (PBE), el Operador de Patio, los canales 0 y 8 (8 para maniobras).

4.4. Selección de los números de canales

Los límites de las zonas de canales se reconocen por las cajas pintadas en amarillo, que se encuentran en las inter-estaciones, conocidas como señal B1 (Cambio de Canal de Radio).

En la selección del número de canal hay que tener en cuenta lo siguiente:

- En los equipos de radio de los vehículos de pasajeros, al encender el vehículo, automáticamente se selecciona el canal válido para la zona correspondiente. Para que esto sea válido, el modo de operación del radio debe estar en modo AUTOMÁTICO.
- En las líneas comerciales y con operación rutinaria, los números de canal de los equipos de los vehículos se ajustan automáticamente al pasar por los puntos de referencia donde están ubicadas las señales B1. Este cambio, se realiza por GPS⁶.

⁶ Metro de Medellín LTDA. Manual de Servicio de Transporte. MST-110 p. 20

4.5. Número de llamada

Cada equipo de radio de tren, tienen un número de Identificación de llamada, correspondientes a su identificación de equipo (denominado ID ó Número de Identificación), el cual está conformado por 4 dígitos, conformado por los dígitos “00” seguido de otros dos dígitos correspondientes a la identificación del respectivo número consecutivo de unidad de pasajeros.

Ejemplo:

ID de la Unidad de Pasajeros No 09: 0 0 0 9

ID de la Unidad de Pasajeros N0 42: 0 0 4 2

La identificación de la llamada se visualiza en las consolas de Radio del OPL dependiendo de la programación de cada unidad de pasajeros (de 01 a 42) a las circulaciones (ó Número del Tren), registradas por el Operador de Línea competente.

4.6. Llamada a Altavoces del tren.

El Sistema de altavoces sirve para informar a los usuarios sobre el desarrollo de la operación comercial, así como normas de seguridad del sistema⁷.

La llamada es iniciada por el operador, escoge el ID del tren con el cual desea comunicarse y el modem *C@rlink* envía una trama de datos en MSK que contiene el comando de comunicación a altoparlantes por el canal de operación elegido. El radio en el tren destino recibe la información la pasa al modem MSK quien reconoce el comando y deja habilitado el sistema para realizar la conexión a los

⁷ Metro de Medellín LTDA. Manual de Servicio de Transporte. MST-110. Anexo 10.6 p. 6

altavoces. El radio que ha recibido la señalización de comando de llamada a altavoces, se encuentra en cualquiera de los canales operativos del 1 al 6. El MODEM *C@rlink* cambia el radio temporalmente al canal 9 de data, y transmite el reconocimiento ACK a la solicitud realizada de altavoces y luego de enviada, vuelve el radio al canal según la zona en que se encuentre. Este reconocimiento llega a PCC al operador que abrió la aplicación de conexión a altavoces. Una vez recibido el ACK, el operador procede a realizar la transmisión del mensaje de voz, desde su puesto de operador.

La acción de transmitir el mensaje genera una señal de COR en el *C@rlink* del tren, que hace que este por el puerto RS232 envíe la señal de conexión al panel de Altavoces y este conecte la salida de audio de recepción del radio con el sistema de altoparlantes.

Al terminar la llamada, y desde la aplicación de llamada a altavoces, se oprime el botón ELA OFF, la cual hace que el *C@rlink* envíe la confirmación de desconexión⁸.

4.7. Solicitud a un tren de envío de información

Actualmente el sistema funciona con dos equipos de radio en cada tren, uno en la cabina delantera y otro en la cabina posterior, por lo que el equipo de la cabina delantera opera en el indicado según la zona correspondiente y el equipo posterior opera en el canal 9.

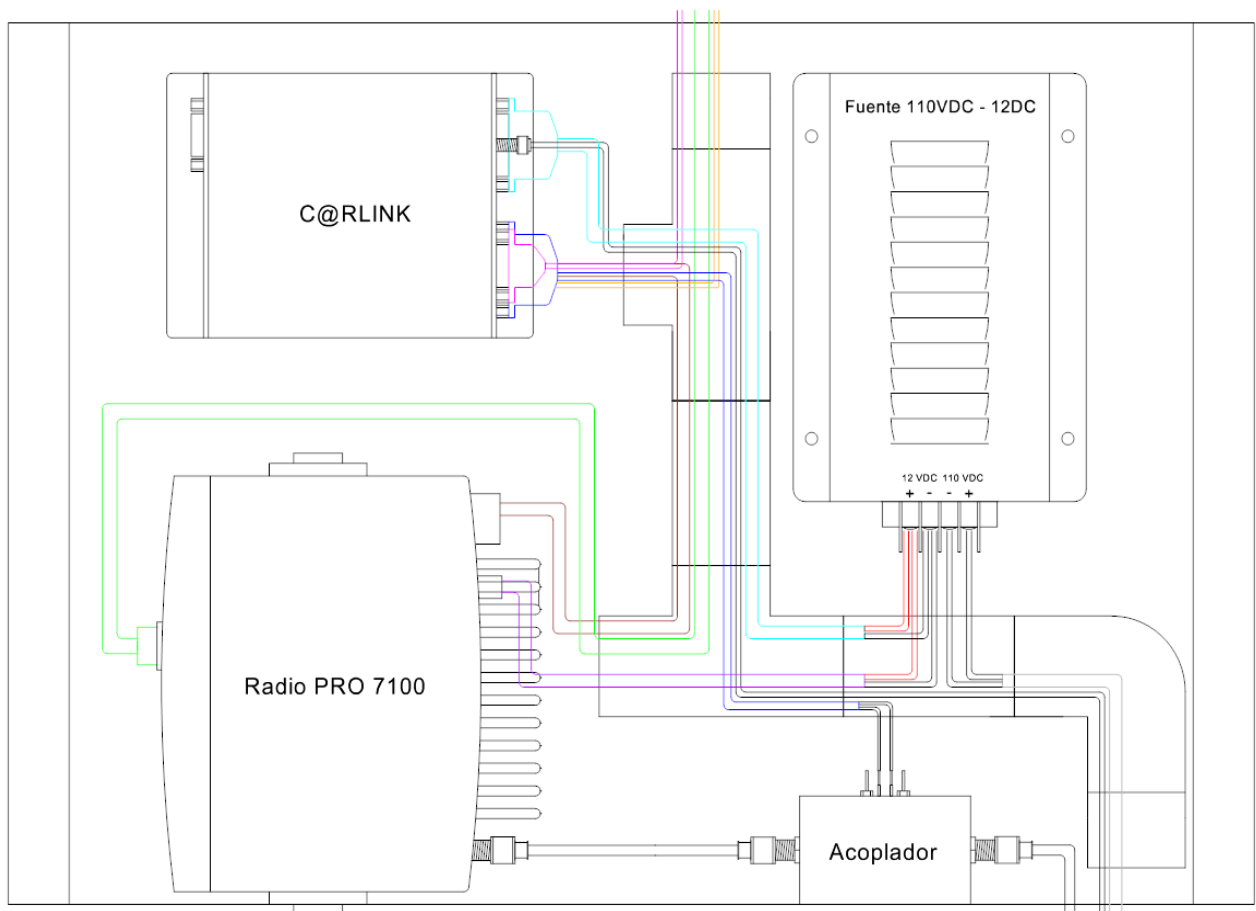
⁸ Metro de Medellín LTDA. Reposición del Sistema de Radiocomunicaciones Operativas del Metro. p 49.

La solicitud de información a un tren se realiza a través del canal 9 y el comando lo da el supervisor u operador sobre una pantalla de la aplicación de *GPS* manejada por el servidor NT.

En el equipo del tren, el mensaje de interrogación es entendido por el equipo *C@rlink*, que transmite a PCC por el canal 9 los datos de posición, intensidad de señal de recepción durante la última llamada recibida, potencia de transmisión del equipo *PRO7100* y potencia reflejada por la antena.

5. CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL SISTEMA DE RADIO EN TRENES

Figura 13. Bandeja de Equipos en trenes.



Como se observa en la figura 13, en cada uno de los trenes se tiene un conjunto de equipos que tienen las siguientes características:

5.1. Radio Motorola PRO7100

Con opción de panel frontal extendido, donde se tiene el altavoz y un display alfanumérico, las características son:

- Banda de operación: UHF, FM.
- Espaciamento de canal: 12.5 KHz
- Capacidad de canales: 128
- Conector posterior de 20 pines, de los cuales hay 7 programables, se indican los pines utilizados en la aplicación, permite interactuar con el equipo para:
 - *Cambio de canales*: 4 pines, cambian hasta 15 canales
 - *PTT Push To Talk*: 1 pin, para activar la transmisión
 - *COR Carrier Operated Relay*: 1 pin, indica que se está recibiendo información
 - *RSSI*: 1 pin, *Receive Signal Stength Indicator*, indica intensidad de señal recibida.
 - *Audio Tx*: 1 pin, conecta a señal de datos a transmitir
 - *Audio Rx*: 1 pin, conecta a señal de datos a recibir
 - *Tierra*: 1 pin, referencia de tierra para interconexiones
 - *12VDC*: 1 pin, sale tensión de alimentación para periféricos.

Para su operación requiere estar interconectado con los otros equipos en la siguiente forma:

- Señal RSSI hacia la unidad *Carlink*
- Señal COR hacia la unidad *Carlink*
- Señal PTT desde la unidad *Carlink*
- Cambio de canales desde la unidad *Carlink*, 4 pines

- Conecta con la antena a través de un acoplador direccional
- Señales varias hacia y desde el Panel Frontal instalado en el Panel de Control
- Alimentación de energía de 12VDC desde la fuente regulada DC-DC
- Alimentación de energía de 12VDC hacia la unidad *Carlink*

Figura 14. Radio PRO 7100.



Fuente: ISEC. Reposición del Sistema de Radiocomunicaciones operativas del Metro, 2002. 78 p.

5.2. *Carlink*

Se le integró al equipo el receptor de *GPS Tyco* incorporado, con antena *GPS* completamente externa. Para su operación en conjunto con los otros equipos requiere manejar o recibir las siguientes señales:

- Señal RSSI del equipo PRO7100
- Señal COR del equipo PRO7100
- Señal PTT hacia el equipo PRO7100
- Cambio de canales del equipo PRO7100, 4 pines
- Señal de potencia directa hacia la antena, de acoplador direccional, 0 a 3 VDC
- Señal de potencia reflejada por la antena, de acoplador direccional, 0 a 3 VDC
- Puerto RS-232 con el Panel de Control
- Alimentación de energía de 12VDC desde el PRO7100

5.3. Panel de Control.

Tiene un *display* numérico de 3 dígitos, *Leds* y teclas para escritura. Para su operación en conjunto con los otros equipos requiere recibir o manejar las siguientes señales:

- Puerto RS-232 hacia el *Carlink*
- Señales varias hacia y desde el equipo de radio PRO7100
- Alimentación de energía desde el equipo PRO7100
- Audio de micrófono local hacia el sistema de altavoces de los vagones, 2 hilos
- Audio de RX hacia el sistema de altavoces de los vagones, 2 hilos
- Comando de relevo de mic local hacia el sistema de altavoces de los vagones
- Comando de relevo de audio de RX hacia el sistema de altavoces de los vagones
- Entrada de micrófono local

5.4. Acoplador Direccional

Entrega una tensión DC entre 0 y 3 voltios función de la potencia que va hacia y regresa de la antena, requiere las siguientes conexiones:

- Línea coaxial de radiofrecuencia al equipo PRO7100
- Línea coaxial de radiofrecuencia hacia la antena de UHF
- Salida de muestra de potencia a la antena hacia la unidad *Carlink*
- Salida de muestra de potencia reflejada por la antena hacia la unidad *Carlink*

5.5. Fuente de Alimentación

Entrega 13.6VDC a partir de la tensión interna del tren de 110VDC, para la alimentación del equipo PRO7100 y los demás accesorios.

5.6. Antena Omnidireccional de UHF y Antena GPS

Estas Antenas van montadas sobre el techo del tren, donde se garantiza un espacio abierto para hacer más eficientes las recepciones de las señales.

6. FUNCIONES DE LOS COMPONENTES

6.1. Equipo de radio PRO7100

Envío de mensajes de voz hacia y desde otros equipos de radio del sistema, tiene como opciones configurarle llamadas selectivas y de emergencia, además de bloqueo de transmisión cuando el canal está ocupado y por prioridad, es decir, que puede ser programado para que, en caso de estarse cursando una comunicación por el canal de radio, al conductor le quede deshabilitada la transmisión, por lo general el conductor permanece comunicado con PCC, para informar anomalías y tener un control sobre los retrasos que se generan en la operación.

6.2. Panel De Control

El panel de control es la interfaz entre el radio, el *Carlink* y el Sistema ELA, permite seleccionar altavoces, seleccionar entre modo manual y automático y visualizar el numero de circulación del tren.

6.2.1. Sistema ELA:

El panel sirve de interfaz entre el sistema de radio y el sistema de altavoces del tren, al seleccionar altavoces el audio del micrófono es encaminado hacia los altavoces del tren.

6.2.2. Modo de operación:

El *Carlink* se encarga del cambio automático de canales del radio del tren, esta opción se puede desactivar con la tecla MAN, pasando a modo manual donde el cambio de canales lo realiza el operador del tren.

6.2.3. Visualización del número de circulación:

El panel de control cuenta con un *display* de 3 dígitos donde es visualizado el número de circulación del tren, cuenta con dos teclas, una para desplazarse y otra para aceptar los números que se ingresan.

6.3. Unidad Carlink

Esta unidad se encarga del envío de mensajes de datos hacia y desde PCC.

6.3.1. Propósito y Alcance del Sistema de Posicionamiento GPS

El sistema de posicionamiento GPS implementado como parte de la red tiene como objetivo principal el de cambiar los canales del equipo de radio PRO7100 a medida que se desplaza un tren, con la finalidad de mantener en todo momento la mejor calidad de comunicación disponible. La precisión del sistema GPS está condicionada fundamentalmente por la precisión que permita la red de satélites de la cual se deriva la información, en las mejores condiciones del sistema se puede obtener 3 m de precisión de posicionamiento en la horizontal, más que suficiente para lograr adecuadamente el objetivo básico que justifica su implementación.

6.3.2. Cambio de canal del equipo PRO7100

A medida que el tren recorre la vía, es preciso que se encuentre siempre al alcance de la estación base/repetidor MTR2000 más cercana y mantenga en esta forma la mejor calidad de comunicación que puede brindar el sistema. Para este propósito entra en juego la Unidad Inteligente *Carlink*. Esta unidad está dotada de un receptor Tyco con una antena externa en la banda de 1575 MHz, que continuamente extrae de la información suministrada hasta por 12 satélites del GPS. La unidad se encuentra dotada del *Firmware* apropiado para que con base

en el dato de posicionamiento global y una decisión de diseño previa, cambiar en el lugar adecuado el canal (frecuencia) de operación del equipo PRO7100. El cambio se lleva a cabo finalmente aplicando una nueva combinación binaria sobre los cuatro pines mencionados anteriormente como "Cambio de Canal" en la descripción del PRO7100.

6.3.3. Envío de parámetros a solicitud de PCC.

El sistema ofrece también la posibilidad de interrogar a voluntad en forma remota desde PCC la unidad *Carlink* de un tren. Cada unidad *Carlink* es programada con un código de identidad único dentro del sistema. Esta disposición de códigos únicos permite al Centro de Control dirigirse específicamente a una unidad en particular e interrogarla. La unidad responderá con una trama donde se encuentran los datos de la fecha, hora, posición, y velocidad.. La solicitud llega por el canal corriente de comunicación de voz y es respondida por el canal de GPS (canal 9). Después del envío de la trama de datos, el PRO7100 regresa a su canal corriente de operación.

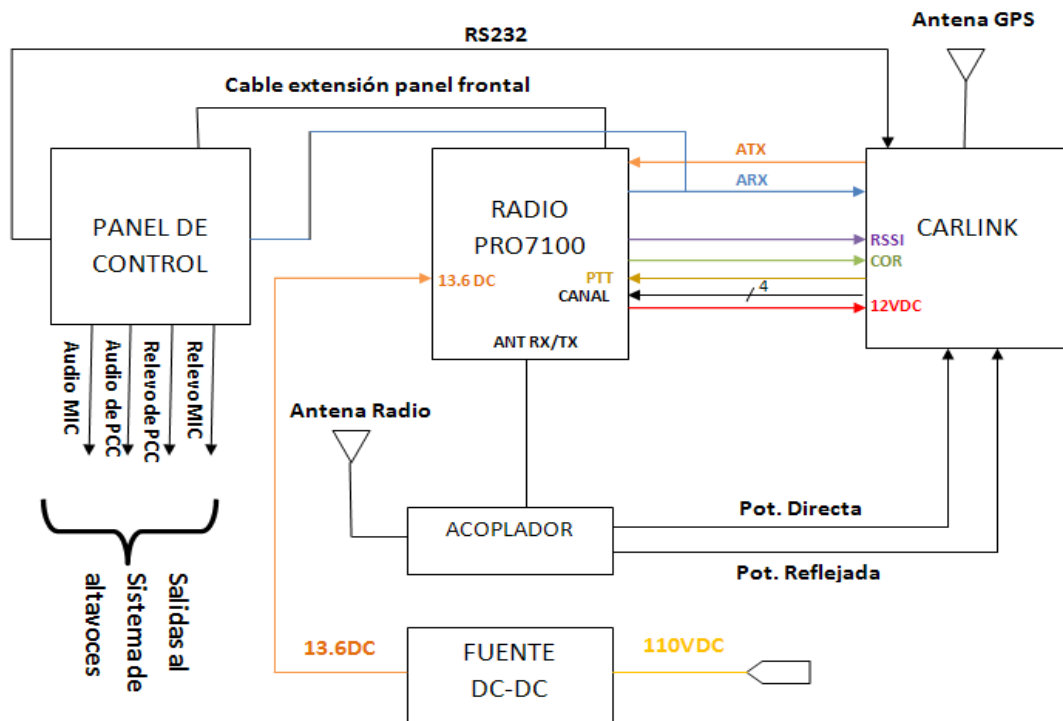
7. DISEÑO DEL EQUIPO

Para el desarrollo del equipo se aplicó un proceso de ingeniería inversa de toda la configuración del equipo de radio en trenes, para determinar el papel que juega allí el *Carlink*, con el fin de determinar cómo es su funcionamiento y la interacción con los demás equipos. Todo esto acompañado de la documentación desarrollada por AVL, que fue entregada al Metro de Medellín en el momento de ejecutar el contrato.

7.1. Especificaciones Técnicas

El siguiente diagrama de bloques, muestra como interactúa el módulo *Carlink*, a través de sus entradas y salidas, con los demás equipos que conforman la configuración del sistema de radio en los trenes.

Figura 15. Diagrama de bloques de entradas y salidas de los equipos.



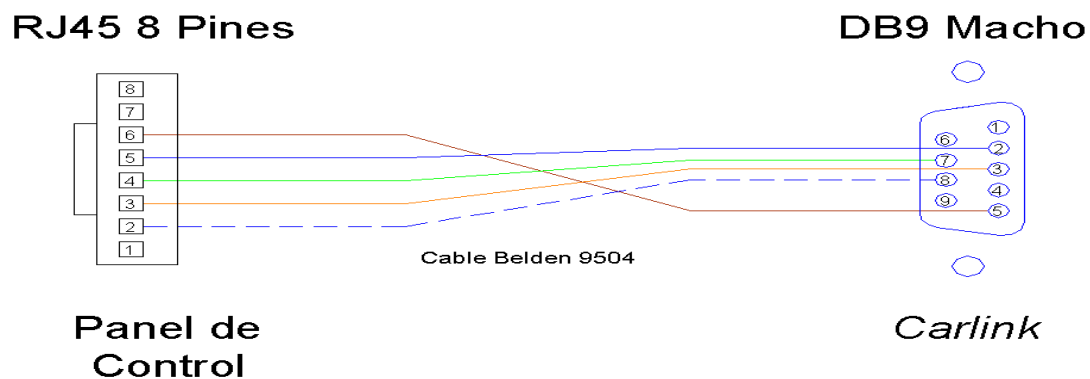
La fuente del equipo Carlink (13.6 VDC) llega del radio por un conector DB15 macho:

Tabla 2. Distribución pines Conector DB15 de Alimentación.

Conector DB15	Señales
1	Entrada IGNICIÓN
2	No se Usa
3	No se Usa
4	No se Usa
5	No se Usa
6	No se Usa
7	No se Usa
8	No se Usa
9	No se Usa
10	GND
11	GND
12	GND
13	No se Usa
14	13.6 VDC
15	13.6 VDC

Para la conexión RS232 entre el Panel de control y el *Carlink*, se utiliza un cable compuesto en sus extremos por un conector RJ45 de 8 pines y un conector DB9 Macho.

Figura 16. Cable Serial.



Las demás señales se capturan del puerto de control del radio PRO7100, y llegan al *Carlink* por un conector DB15 Hembra.

Figura 17. Cable Radio-*Carlink*

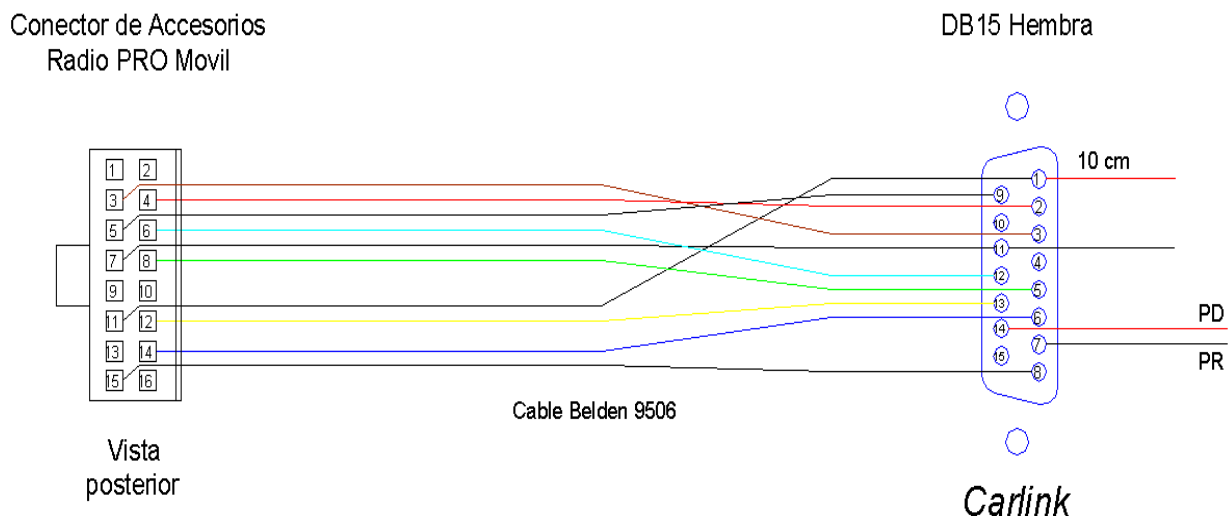


Tabla 3. Distribución pines Conector DB15 *Carlink*

Conector DB15	Señales
1	RX Audio
2	COR
3	PTT
4	NC
5	Canal Bit 1
6	Canal Bit 3
7	Potencia Reflejada
8	RSSI
9	TX Audio
10	GND
11	GND
12	Canal Bit 0
13	Canal Bit 2
14	Potencia Directa
15	NA

7.2. Señales *Carlink*

- *Rx audio*: Señal de audio de recepción que es analizado, cuando hay detección de portadora por parte del modem MSK.
- *COR (Carrier Operated Relay)*: Indicación del estado de canal ocupado del radio, al estar recibiendo información.
- *PTT (Push To Talk)*: Esta es una salida que activa el control de PTT para transmitir datos.
- *Control de canales*: El control de canales del radio se realiza con la debida combinación de los 4 pines que se especifican como “Canal” y su Bit correspondiente.
- *Potencia reflejada*: La potencia reflejada se refiere a la parte de la energía de radiofrecuencia que llega a la antena del radio y es rechazada, para un correcto funcionamiento esta potencia debe ser pequeña. El *Carlink* representa esta energía como una señal análoga con resolución de 10 bits que indica el valor de potencia reflejada hacia el equipo.
- *RSSI (Receive Signal Strength Indication)*: Indicador de fuerza de señal de recepción. Este término se usa comúnmente para medir el nivel de fuerza de las señales recibidas. Cuanto más alto sea el número, mejor captura de la misma. El *Carlink* entrega un valor equivalente a la señal análoga con resolución de 10 bits que indica el nivel de señal recibida en el equipo.
- *Tx audio*: Señal de audio del módem con información que va hacer transmitida.
- *Potencia directa*: La potencia directa es la energía generada por el radio que llega a la antena. El *Carlink* la representa como una señal análoga con resolución de 10 bits que indica el valor de potencia radiada en la antena.

7.3. Componentes del Diseño

Se identifican 3 componentes principales que conforman el equipo *Carlink*, que son el Microcontrolador, el receptor GPS, y chip utilizado para el funcionamiento del radio modem.

A continuación se enuncian los componentes principales que fueron elegidos, conforme a una necesidad y funcionamiento del *Carlink*.

7.3.1. Microcontrolador

Ya se tenía establecido desarrollar el firmware en el entorno gráfico de programación *Microgrades*, por lo que el Microcontrolador debería ser compatible con este software, algo que no tiene mayor problema gracias a que prácticamente todas las familias de Motorola de 8 bits están disponibles. Por lo que la selección se centro principalmente en la necesidad de dos comunicaciones seriales y mínimo cuatro canales análogo-digitales disponibles.

El MC68HC908AP16 cumple las características requeridas además la mayoría de documentación de *Microgrades* utiliza este Microcontrolador, por lo que el *Firmware* fue desarrollado en este.

Las características principales son:

- Arquitectura de alto rendimiento M68HC08
- Frecuencia interna del bus 8 MHz, con voltaje de operación de 5V o 3V
- Programable en el circuito
- 16 Kbytes de memoria FLASH
- 1 Kbytes de memoria RAM

- 2 Temporizadores de 16 bits de 2 canales (TIM1 y TIM2), con captura de entrada seleccionable, comparadores y PWM en cada canal
- 2 módulos de Interfaz Serial de Comunicación asíncrono (SCI), el segundo con codificador/decodificador infrarrojo
- Módulo de Interfaz Serial de Comunicación Síncrona (SPI)
- 8 canales para conversión Análogo/Digital de 10 bits
- 32 pines de entradas y salidas de propósito general
- Diseño de bajo consumo, completamente estático y modos de espera y parada

7.3.2. Receptor GPS

Se optó por integrar un desarrollo realizado con los receptores GPS de Tyco, ya que eran de fácil adquisición a nivel local y de inmediato se podía trabajar con ellos recibiendo las tramas vía puerto RS232, sin necesidad de realizar ninguna conexión extra.

Se implementó un herramienta desarrollada con receptores GPS A1037-A de Tyco, trabajando hasta 12 satélites y entregando la ubicación y el tiempo vía puerto RS232, mediante el uso de mensajes MNMEA.

Figura 18. Herramienta con Receptor GPS de Tyco.



7.3.2.1. Características Generales

Combina el módulo GPS de pequeño tamaño y de alta gama con la funcionalidad a un bajo consumo de energía:

- Operable en 3.3V / 50 mA (típ.) @ 1 muestra por segundo
- Puntos de soldadura para conexión de la antena.
- 3 m de precisión de posicionamiento en la horizontal.
- Frecuencia: 1575 MHz.
- Conexión RS232 para control por comandos AT.
- Alimentación a 3.3V para antena activa.
- Conector para antena

7.3.2.2. Código NMEA

La información que llega del GPS corresponde a códigos NMEA (National Marine Electronics Association), es una especificación combinada eléctrica y de datos entre aparatos electrónicos marinos. Es un protocolo que emplea datos en código ASCII para el control y la comunicación del dispositivo. Este protocolo es un estándar mundial utilizado por la mayoría de los GPS.

El GPS de TYCO soporta los mensajes NMEA de salida: GGA, VTG, RMC, GSA, GSV.

- **GGA – Estatus del receptor.** El mensaje GGA incluye el tiempo, la posición y datos relacionados al estatus del receptor.
- **VTG – Rastreo bien hecho y velocidad en tierra.** El mensaje VTG transmite el rastreo actual y la velocidad desarrollada por el receptor en tierra.

- **RMC – Información mínima de navegación.** El mensaje RMC contiene la hora, fecha, posición, dirección y velocidad proporcionadas por el receptor GPS.
- **GSA – Satélites Usados.** El mensaje GSA Incluye los números de los satélites que se utilizan, además de indicar la precisión de la revisión.
- **GSV – Satélites visibles.** El mensaje GSV identifica los satélites que son visibles por el GPS, incluyendo su número PRN.

7.3.3. RTC

Con el fin de mejorar el tiempo en que el GPS capta el primer dato válido de los satélites, el receptor GPS cuenta con un comando donde se le proporciona la información aproximada del tiempo actual y la posición aproximada del lugar en que se encuentra, para esto se utiliza un circuito RTC que maneje la hora real en todo momento. El integrado utilizado es el DS1307 y tiene las siguientes características:

7.3.3.1. Características Generales del DS1307

El DS1307 es un poderoso reloj calendario en BCD, cuyas características más destacadas son las siguientes:

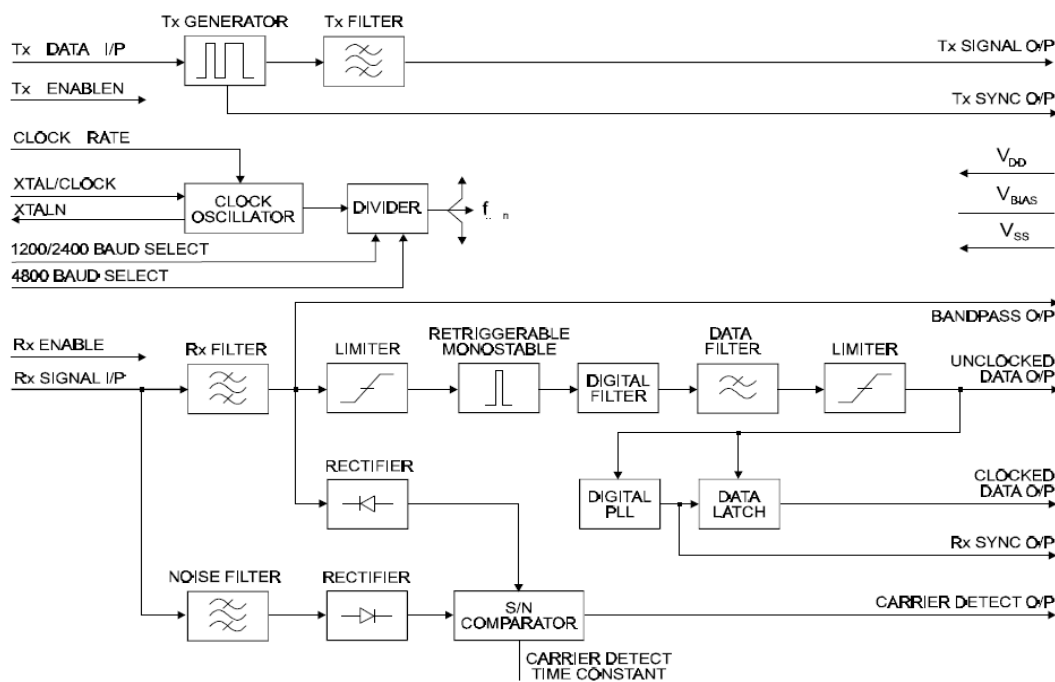
- Reloj de tiempo real que cuenta los segundos, los minutos, las horas, la fecha, el mes, el día de la semana, y el año, con compensación de años bisiestos, válido hasta el año 2100
- Formato de 12 Horas con indicador AM/PM ó de 24 horas
- Protocolo I2C
- 56 bytes de RAM no volátil, para almacenamiento de datos
- Señal de onda cuadrada programable

- Circuitos internos de respaldo para la alimentación automático
- Bajo consumo de potencia: menor a 500nA en modo respaldo, a 25 grados Centígrados
- Sólo 8 pines

7.3.4. CMX469A FFSK/MSK Modem

Para el desarrollo del Modem MSK, se consulto a la empresa CML Microsystems, para conocer qué alternativas tenían y que chip se ajustaría más a las funciones requeridas; fueron recomendados las referencias CMX469A, CMX882, CMX7041; estos dos últimos un poco más complicados de utilizar y además ofrecen mucho más de lo que se necesita para el proyecto. Encontrando entonces que el chip que se utiliza actualmente, el CMX469A es la solución más sencilla y eficiente para el desarrollo.

Figura 19. Diagrama de Bloques CMX469A.



El CMX469A es un chip CMOS que opera como *Full-Duplex* de 1200,2400 o 4800 baudios FFSK/MSK modem. Las señales y espacios de frecuencias son 1200/1800, 1200/2400 y 2400/4800 Hz respectivamente. Es necesario utilizar un cristal oscilador que permite escoger dos frecuencias que son 1.005Mhz o 4.032Mhz, proporcionando una rata de baudios y lo más importante que es la sincronización de la recepción y la transmisión.

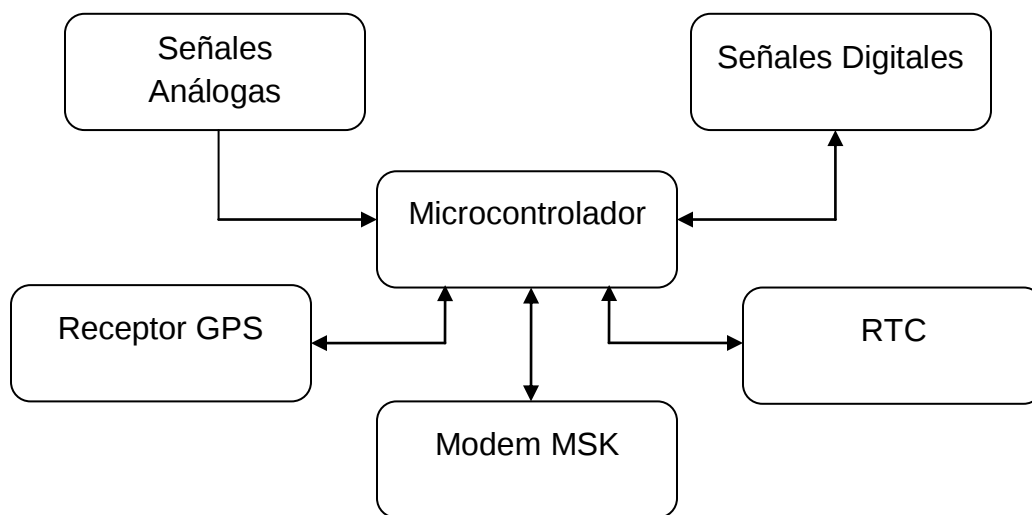
Como se observa en el diagrama de bloques, el transmisor y el receptor operan totalmente independientes, incluyen un circuito detector de portadora y de recuperación del reloj, disponibles en pines de salida del chip. Las etapas de transmisión, recepción y detector de portadora, contienen filtros pasa-banda que optimizan las condiciones de señal en cada sección del modem.

El CMX469A demuestra buena sensibilidad y BER (*Bit Error Rate*) aún en condiciones adversas de señal.

7.4. Diagramas de Diseño *Carlink*

7.4.1. Diagrama General de Conexión

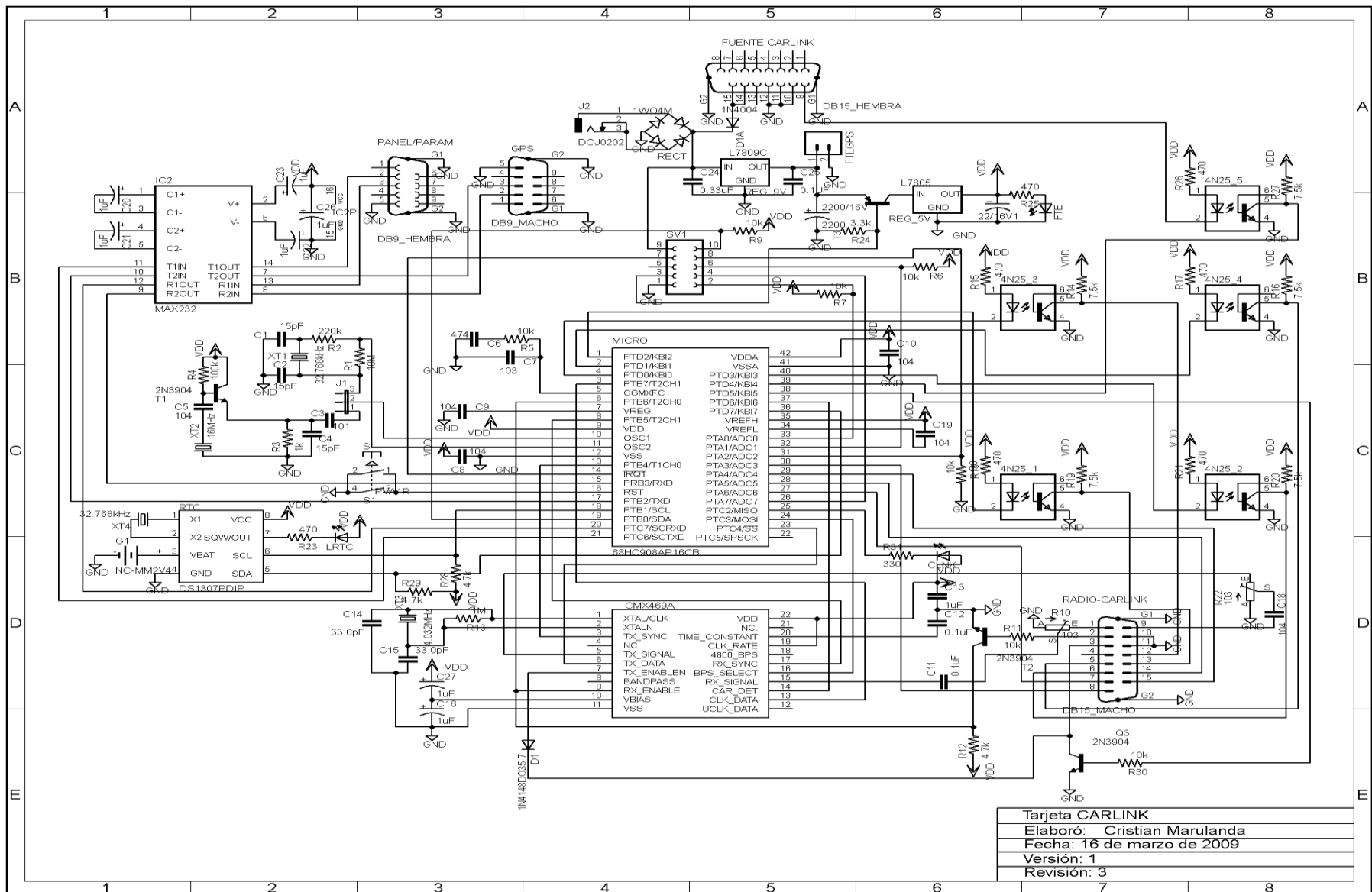
Figura 20. Diagrama de Bloques General del *Carlink*



7.4.2. Diagrama Detallado del *Carlink*

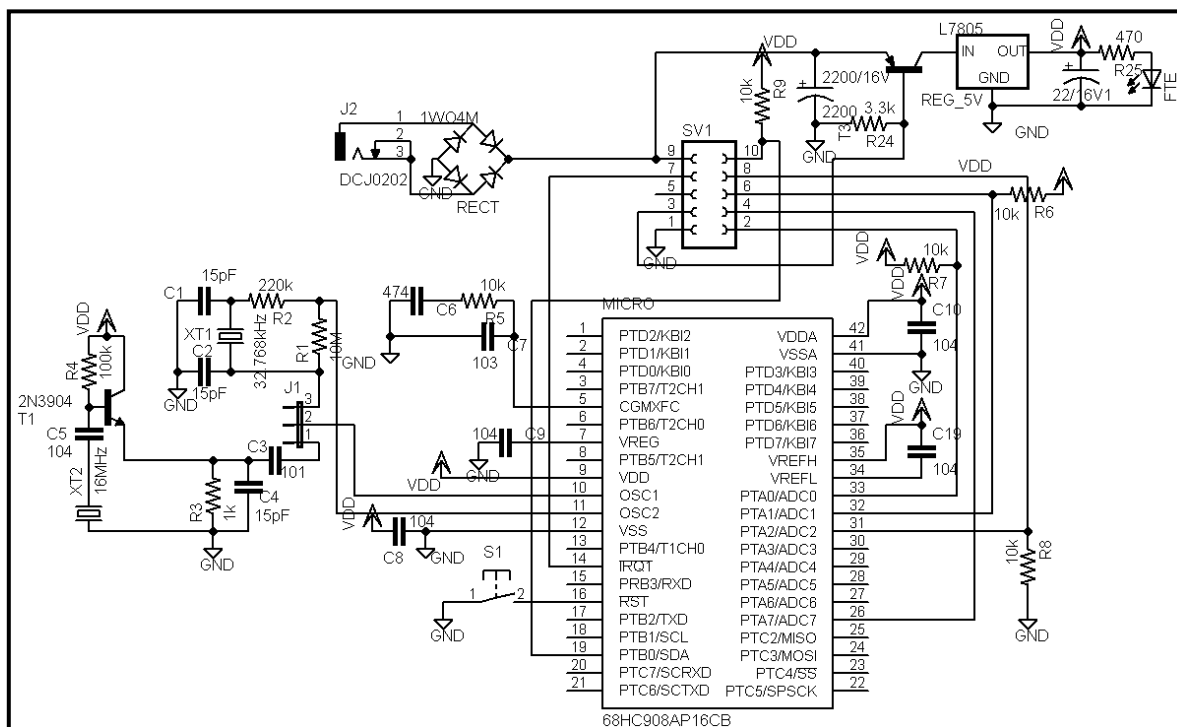
La siguiente figura ilustra el diagrama detallado de conexión del hardware del *Carlink*.

Figura 21. Diagrama detallado de conexión Carlink



7.4.2.1. Conexión Básica del Microcontrolador

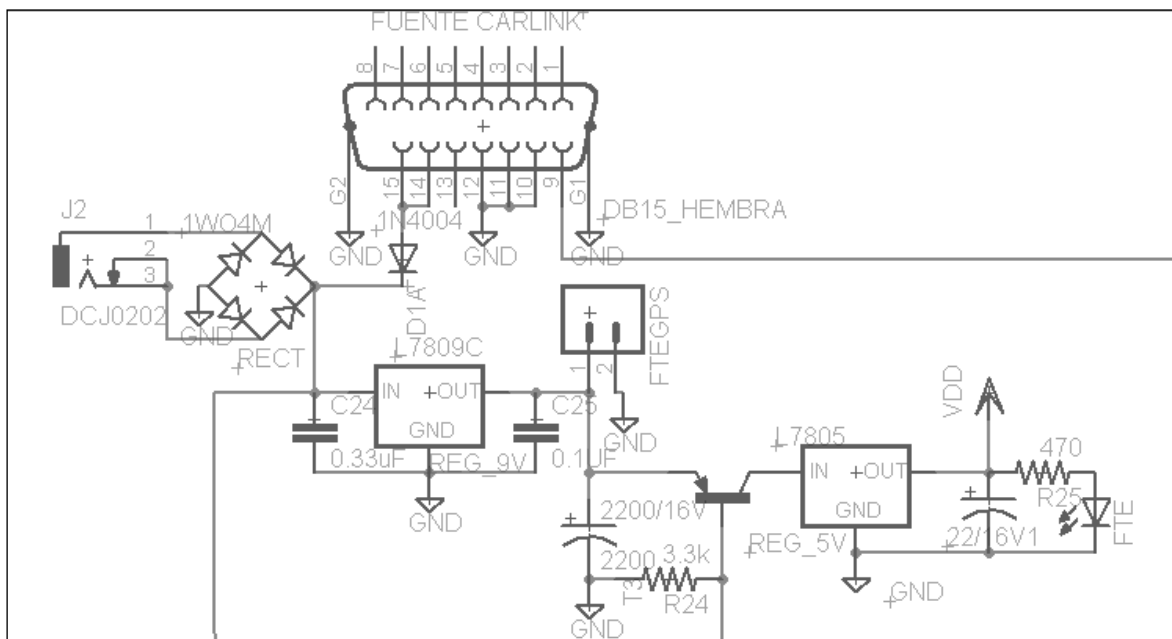
Figura 22. Conexión Básica del Microcontrolador.



La figura ilustra la conexión básica del Microcontrolador para programar *on circuit* con *Microgrades*, cuenta con un Jack como alternativa de alimentación, además de un *Jumper* que permite establecer el modo monitor cuando se va a programar por primera vez para la descarga del firmware de *Microgrades*, después de esto se cambia el *Jumper* para programar en modo usuario.

7.4.2.2. Fuente Carlink

Figura 23. Conexión de la fuente del *Carlink*

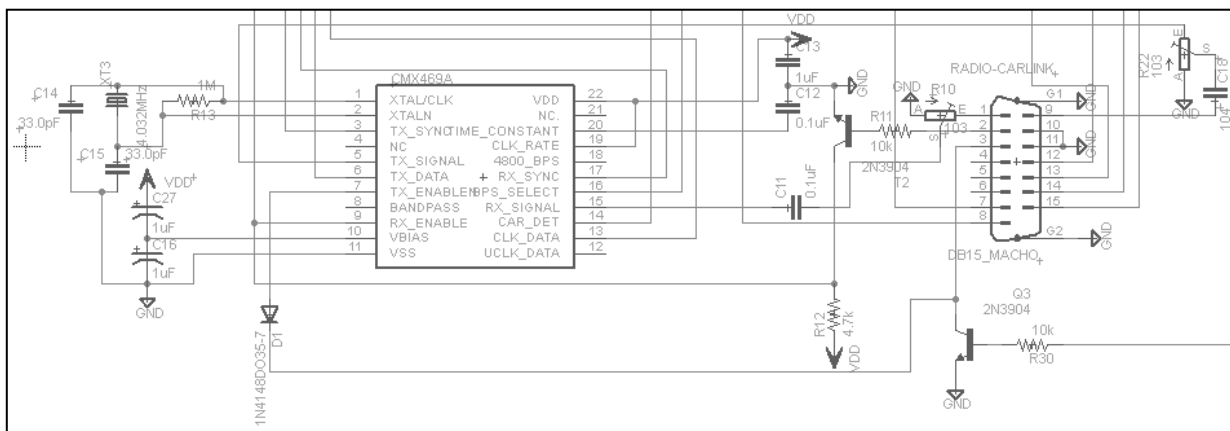


En la configuración del sistema de radio en los trenes, la alimentación llega del conector DB15, por lo tanto el Jack se utilizaría en el momento que se desee bajar el equipo para realizar determinada tarea. En la alimentación por el *Jack* se encuentra un rectificador que cumple dos funciones principales, la primera es evitar las molestias de chequear la polaridad del adaptador y por otro lado permite que el sistema trabaje con una fuente de AC.

En general la alimentación posee condensadores de carga y de desacople que brindan al sistema mayor protección contra interferencias electromagnéticas presentes en el ambiente de trabajo. Se tienen dos reguladores, el 7809 para la alimentación del Receptor GPS y el 7805 para el circuito en general.

7.4.2.3. Conexión CMX469

Figura 24. Conexión Modem MSK

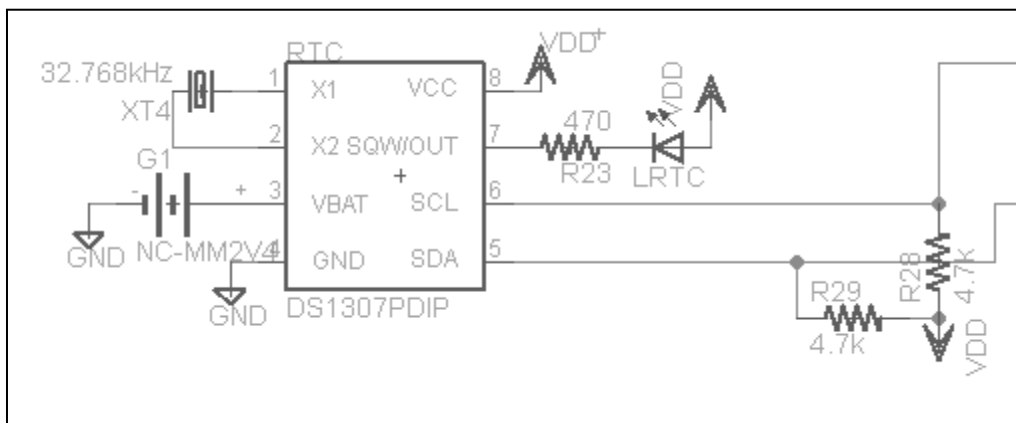


La conexión básica del CMX469, es la detallada en la hoja de datos, las demás conexiones se ajustan a la lógica negada con la que trabaja el radio y con el fin de proteger el integrado. Los *Trimmer* son usados para realizar ajustes de señal de audio. Se utiliza un cristal de 4 MHz, para tener la opción de utilizar los 4800 bps de operación, aunque el modem está configurado para trabajar con velocidad de 1200 bps.

La transmisión y recepción son secciones totalmente independientes, para transmitir se ingresa los datos seriales por el pin dedicado, sincronizándola con el *clock* generado internamente, de esta forma se logra la señal MSK a transmitir. En la recepción se recibe la señal e igualmente se procesa para recoger el dato serial por el respectivo pin.

7.4.2.4. Conexión RTC

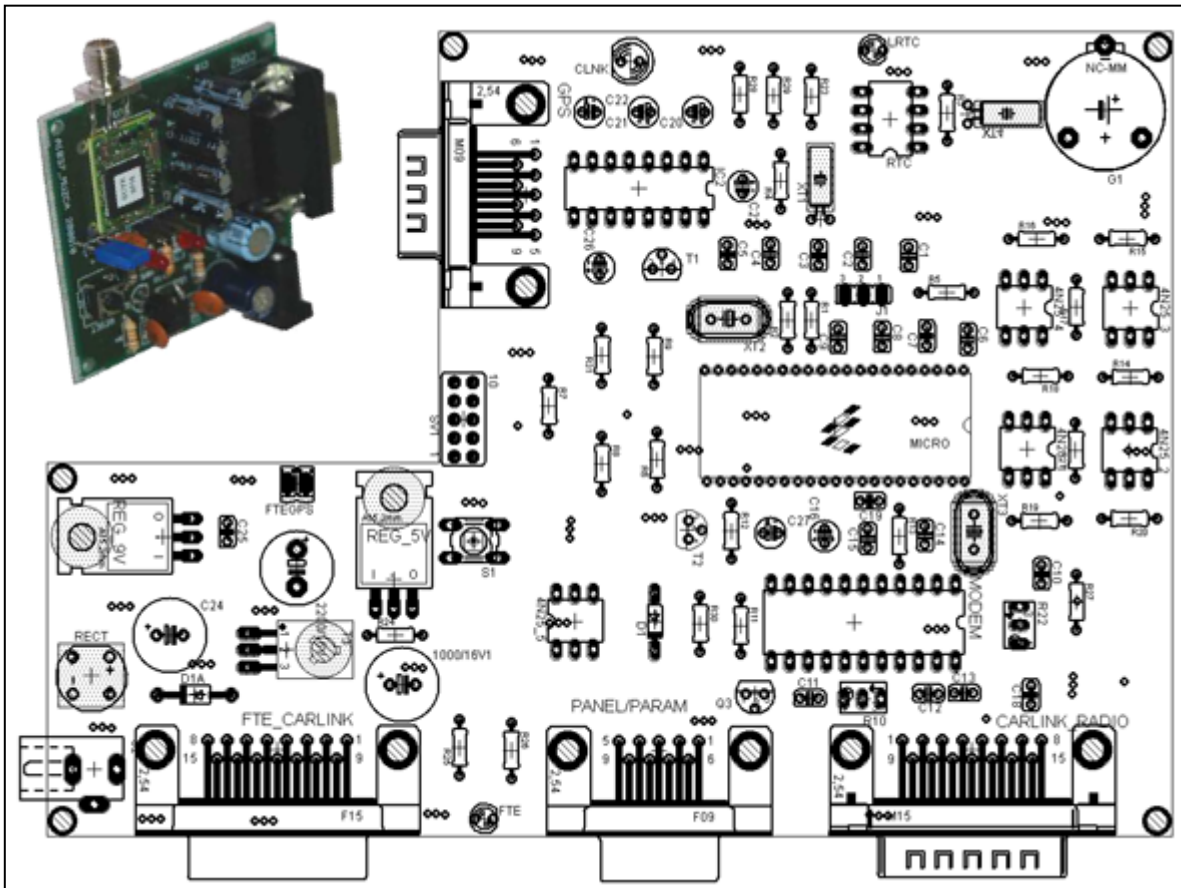
Figura 25. Conexión del RTC.



La conexión del circuito RTC en el *Carlink* se basa en la conexión típica dada en la hoja de datos, agregando un LED en el Pin SQW/OUT, donde se indica la frecuencia de salida a la que está configurado el RTC, para este caso de 1Hz. El valor de las resistencias utilizadas es de 4.7 k, el valor del cristal y la batería es el recomendado por la hoja de datos

8. DISEÑO PCB

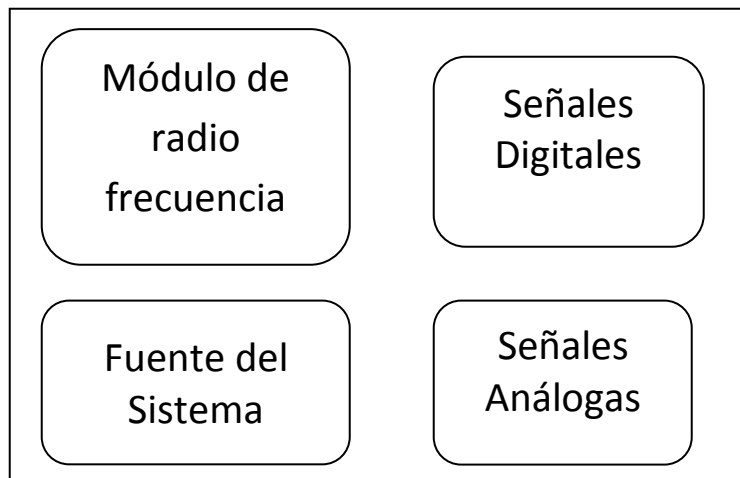
Figura 26. Distribución de componentes PCB *Carlink*



Se utilizaron dos capas implementando una serie de técnicas con el fin de combatir la EMI, que puede afectar de forma indeseable el buen desempeño del desarrollo.

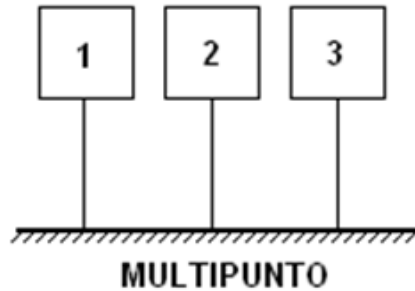
La ubicación espacial de cada componente de acuerdo a la señal que manejan, con el fin de darle un orden visual al diseño y para que las señales de potencia no interfieran con las demás señales, la radiación electromagnética de la antena GPS debe estar lo más alejada posible de las señales digitales para evitar la interferencia.

Figura 27. Distribución de Etapas PCB *Carlink*



- Los caminos que interconectan los componentes no tiene cruces de 90 grados y la separación entre estos es mayor a 8 milésimas de pulgada para evitar que los residuos de soldadura generen cortos. Los caminos de potencia tiene un espesor mayor debido a la corriente que circula en ellos, además la longitud de los caminos es la menor posible así se garantiza que no se generen capacitancias parasitas que introduzcan señales no deseadas al circuito.
- Se utiliza una tierra multipunto para evitar *Loops* de corrientes ó fuentes de ruido, esto se logra con un plano de masa solido y aproximadamente del tamaño del PCB.

Figura 28. Esquema para un sistema de tierra Multipunto.



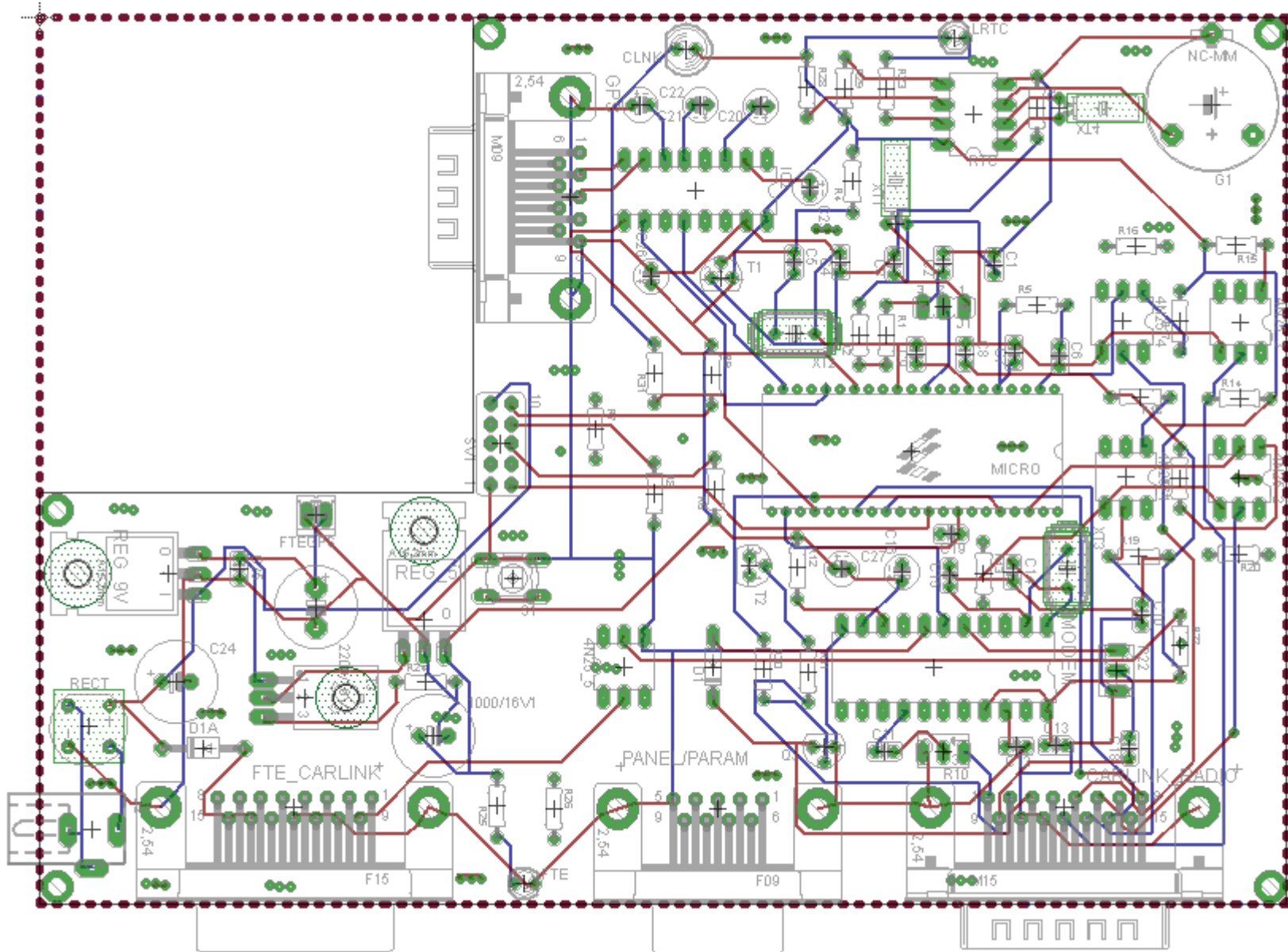
- Para fortalecer la tierra multipunto, es necesario unir ambos planos, esto se logra con vías en todo el área del plano, con una distancia igual al resultado de:

$$\frac{\lambda}{20} = \frac{c}{f_{GPS}} = \frac{c}{1575MHz} * \frac{1}{20} = 0.99cm \quad (2)$$

Dentro de los parámetros que determinan la calidad de una buena tierra se encuentra la frecuencia de operación del circuito. En este diseño el GPS posee una mayor frecuencia de operación que es de 1575MHz, con este valor se encuentra que la distancia que es aproximadamente de 1 cm. En resumen se paso de tener dos planos de referencia separados y superpuestos a un solo plano, fortaleciendo el nodo de tierra.

- Al realizar la conexión entre componentes se busca que el cambio de capas sea la menor posible, de esta forma evitar cruces rectos y evitar introducir ruido al sistema.

Figura 29. Conexiones PCB



9. DESARROLLO EXPERIMENTAL

9.1. Zonas de Radio

Como se menciono anteriormente los cambios de canal se dan en determinadas inter-estaciones, por lo que dos inter-estaciones forman una zona. En la siguiente tabla se especifican las zonas de radio donde interviene el *Carlink* para el cambio de frecuencia del Radio Motorola PRO 7100, con el respectivo canal y dimensión.

Tabla 4. Zonas de Radio.

ZONAS DE RADIO	CANAL	DIMENSIÓN		OBSERVACIONES
		DESDE	HASTA	
Patios de Bello	0	Patios de Bello en general	Inter-estación BEO-MAD	Entrada y Salida de trenes
Patios de Bello	8	Patios de Bello en general		Servicio de maniobras
Línea A-Norte	1	Estación NIQ	Inter-estación ACE-TRI	
	2	Inter-estación ACE-TRI	Inter-estación HOS-PRA	
Línea A-Sur	3	Inter-estación HOS-PRA	Inter-estación POB-CAT	
	4	Inter-estación POB-CAT	Estación ITA	
Línea B	5	Estación SAB	Estación JAV	
Vía de Enlace	5	Estación CAR V68SAM	SAM	Cambio de Línea A a Línea B
Vía de Enlace	2	SAM V68SAM	Estación CAR	Cambio de Línea B a Línea A

9.2. Adquisición y análisis de puntos GPS

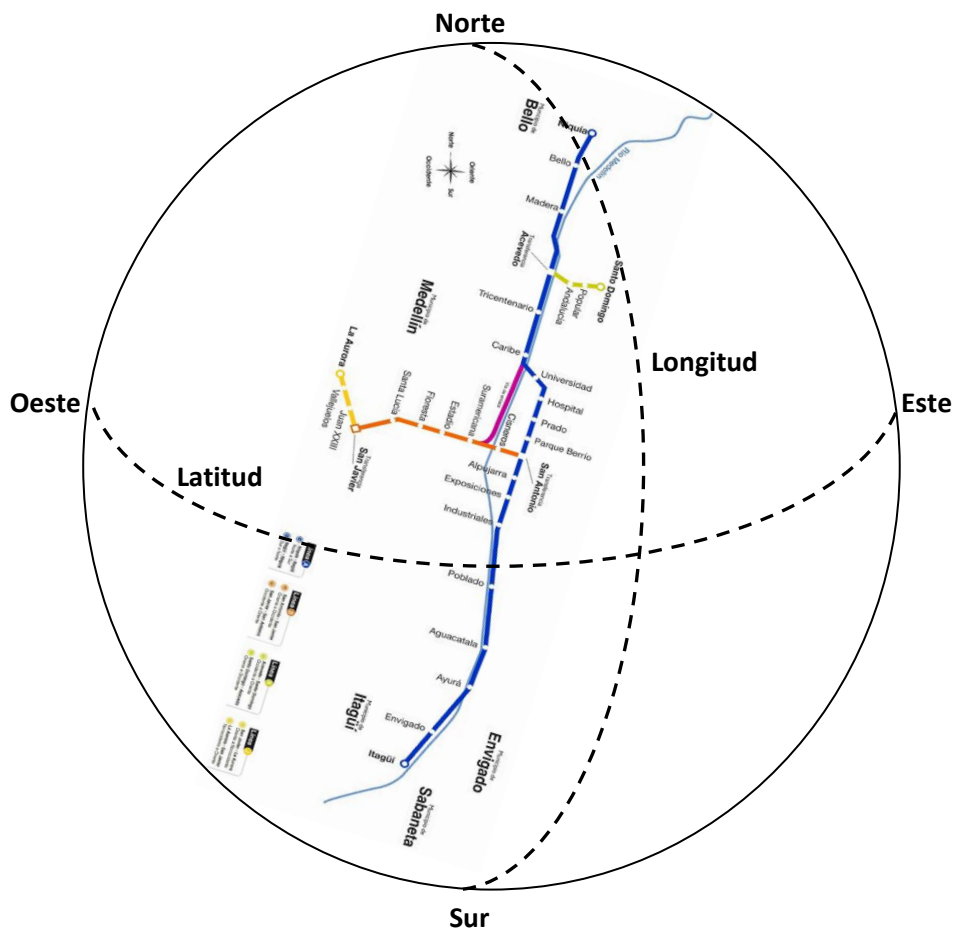
Para lograr el cambio automático de los canales de radio según la posición GPS, fue necesario salir a las vías del metro y tomar las medidas correspondientes en los puntos específicos donde debe ocurrir el cambio.

La siguiente tabla muestra los resultados de estas medidas.

Tabla 5. Medidas GPS Zonas de Radio.

Medidas GPS de las Zonas de Radio del Metro de Medellín			
Zonas	Inter-Estaciones	Latitud	Longitud
PBE	Salida PBE Madera	06°19'06.4"N	75°33'32.6"O
	Entrada PBE Madera	06°19'08.1"N	75°33'29.7"O
	Entrada/Salida PBE Bello	06°19'77.2"N	75°33'23.3"O
Línea A	Retorno NIQ	06°20'32.6"N	75°32'45.3"O
	Inter-estación ACE-TRI	06°17'70.3"N	75°33'71.9"O
	Inter-estación HOS-PRA	06°15'54.5"N	75°33'71.9"O
	Inter-estación POB-CAT	06°12'03.1"N	75°33'71.9"O
	Retorno ITA	06°09'69.8"N	75°36'62.8"O
Línea B	SAB	06°14'77.4"N	75°34'15.5"O
	JAV	06°15'44.8"N	75°36'85.8"O
Vía de Enlace		06°16'17.2"N	75°34'28.3"O

Figura 30. Ubicación Sistema Metro con respecto al sistema de coordenadas.



76

la entrada Patios Bello por la estación Madera, donde la vía se encuentra en la mitad de las dos vías comerciales, es decir, a menos de 3 metros de ambas vías y 3 metros es la precisión teórica del Receptor GPS de Tyco, por lo que para evitar la incertidumbre de estas medidas se evalúan otros parámetros aparte de la posición que son la dirección y la velocidad, específicamente allí se debe cumplir que en una zona de aproximadamente $50 m^2$, se encuentre en dirección norte, es decir, descendente y a una velocidad menor de 21 Km/h, ya que la velocidad de maniobra no debe sobrepasar los 20 Km/h y cuando los trenes pasan por esta zona en vía comercial pasan a más de 40 km/h, además antes de entrar a patios bello, el conductor debe esperar a que le den señal permisiva.

En el caso de entrada a PBE por Bello, se encuentra que a menos de 3 m, esta la vía comercial que va hacia el norte, por lo que solo se debe cumplir la posición y la dirección hacia el sur, es decir, en dirección ascendente.

Las zonas de radio para las líneas del metro de Medellín se pueden ver en el Anexo C.

9.3. Comunicación MSK

La Transmisión de parámetros del tren y la activación y desactivación de altavoces, ELA ON y ELA OFF respectivamente, son funciones que se ejecutan, cuando es requerido desde PCC hacia los trenes por medio del modem MSK, por lo que allí fue donde se hicieron las primeras capturas de las tramas necesarias para la comunicación, al no existir documentación al respecto.

9.3.1. Tramas desde PCC

Para conocer las tramas respectivas se ejecuto la aplicación *AVL Router*, que arroja los bytes recibidos según la petición que se haga desde el *AVL Dataserver*. La siguiente imagen ilustra la información que reporta el *AVL Router*, al solicitar parámetros a un tren.

Figura 31. Solicitud Parámetros AVL Router.



Como se observa en Puerto de Mensajes, el comando para pedir parámetros a un tren es:

>SND001APOS6<

De igual forma se obtuvieron las demás tramas.

ELA ON:

>SNDxxxxy5ES2<

ELA OFF:

>SNDxxxxy5ES3<

Parámetros:

>SNDxxxxyPOS6<

Donde:

xxx: Se reemplaza por el número de identificación del *Carlink* que es igual al número de la unidad.

y: Se reemplaza por el coche al que se hace el envío (A o B).

9.3.2. Tramas *Carlink*

Los comandos que se ejecutan desde PCC, no son los mismos que llegan al equipo, por lo que se hizo una nueva captura, realizando un montaje en el laboratorio de electrónica del Metro de Medellín, simulando la comunicación entre PCC y el tren, obteniendo los siguientes resultados.

- ELAON

Desde PCC el *Carlink* recibe el siguiente comando:

>xxx5ES2<

El *Carlink* envía hacia el panel de control:

P

Para poner altavoz activo.

El *Carlink* responde a PCC con la trama 6:

>6 ## HH MI SS la la la la lo lo lo lo vv vS MM DD cc cc hh hh NN SS NT A1 A2
A3 A4 BB OI ID ID<

Ejemplo:

3E 36 06 08 03 55 00 00 00 00 00 00 00 00 01 08 17 00 00 00 00 0A 00 00 A2
00 84 87 8A 00 00 01 3C

Cada byte es un número hexadecimal de dos dígitos. Sólo se explicarán los campos utilizados en el proyecto:

>: Inicio de la trama.

6: Número de la Trama, en este caso el 6.

HH: Hora Actual.

MI: Minutos.

SS: Segundos.

la la la la: Latitud en la que se encuentra el tren.

lo lo lo lo: Longitud en la que se encuentra el tren.

vv v: Indican la velocidad a la que va el tren, expresada en Km/h.

MM: Mes del año actual.

DD: Día del año actual.

hh hh: Altitud en la que se encuentra el tren, está expresada en el formato binario de Motorola.

NN: Número de Canal 00 - 0F.

SS: Estado del sistema de audio en el tren. Los valores posibles son: ELAON/ELAOFF y Manual/Automático, en formato binario 1(A)/0(P) y 1(A)/0(M).

A1: Valor de Potencia RSSI.

A2: Potencia Directa (Watts).

A3: Potencia Reflejada (Watts).

ID ID: Identificación del Carlink.

<: Final de la trama.

- ELAOFF

Desde PCC el *Carlink* recibe el siguiente comando:

>xxxy5ES3<

El *Carlink* envía hacia el panel:

A

Para quitar altavoz activo.

El *Carlink* responde de igual forma a PCC con la trama 6.

- PARÁMETROS

Desde PCC el *Carlink* recibe el siguiente comando:

> xxxyPOS6<

El *Carlink* responde de nuevo con la trama 6.

9.4. Control Manual y Automático y PTT

Para que el cambio se realice de forma manual, en el panel de control que se encuentra bajo el e radio, hay una tecla que selecciona entre modo manual y automático. Según el modo en que se quiera operar el radio, el panel de control envía un mensaje al *Carlink*.

- Para Manual

>SIM5ES0<

Donde el *Carlink* entrega el control del radio al conductor, poniendo todos los pines en alto.

- Para Automático

>SIM5ES1<

Donde el *Carlink* retoma el control del radio, sintonizando la frecuencia del radio según la posición geográfica.

- PTT

Un evento donde el Carlink no puede hacer un cambio de canal de forma automática, es cuando el conductor este estableciendo una comunicación con PCC, para saber esto el panel de control envía:

>SIM01S2<

Indicando que se está transmitiendo desde el radio, es decir, que hay PTT.

Y cuando suelta PTT envía:

>SIM01R2<

Indicándole al Carlink que ya no hay transmisión y puede cambiar canal.

10. MICROGRADES

Para desarrollar el *Firmware* encargado de establecer la lógica y control del equipo, se realizó un estudio previo del entorno de desarrollo *Microgrades* (*Microcontroller Graphic Development System*), recomendado por el director del proyecto, por su diseño interno de programación de estructura de capas que ofrece mayor estabilidad en las aplicaciones allí desarrolladas, además de adquirir conocimientos de otra filosofía de programación.

10.1. Definición

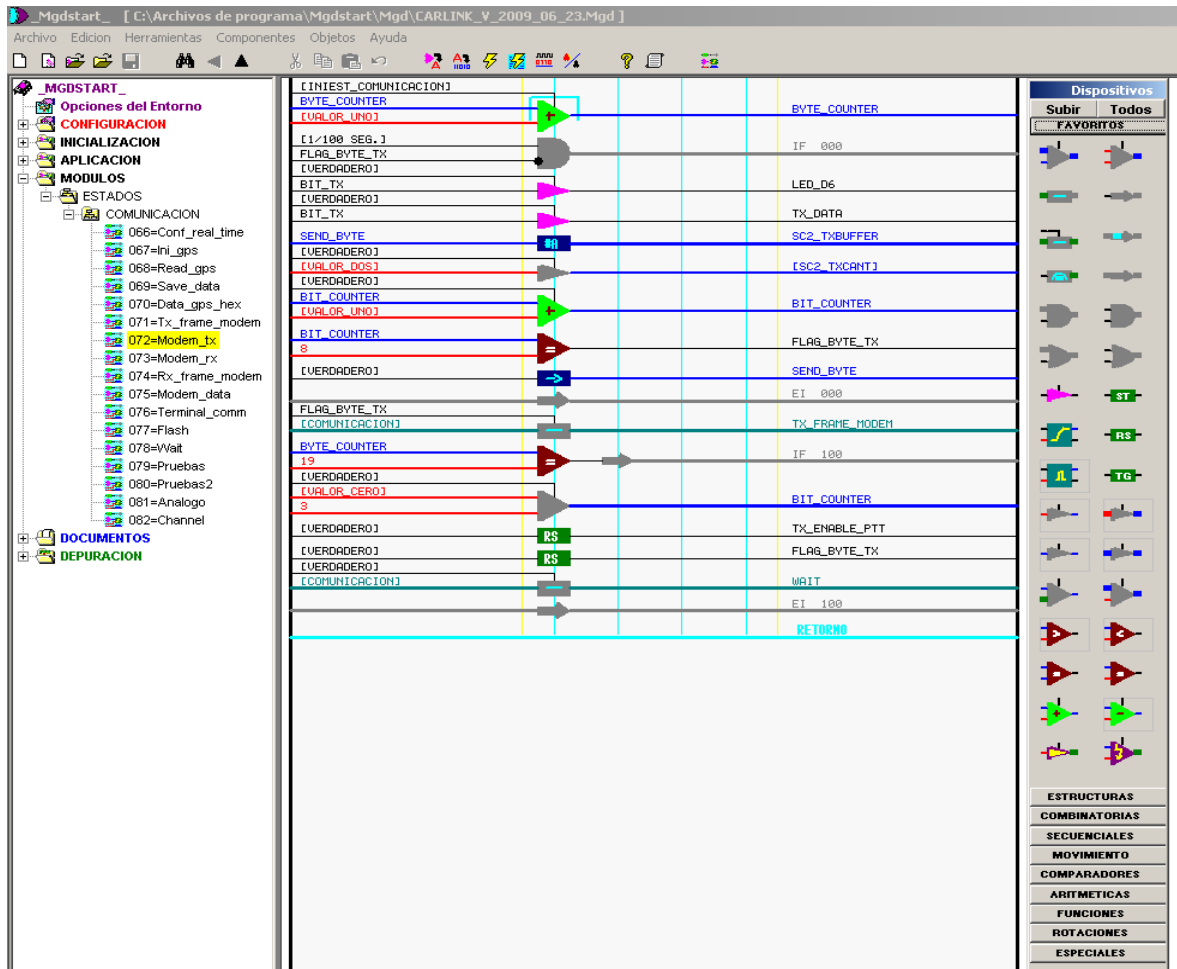
Microgrades es una plataforma de programación para Microcontroladores Motorola, es un entorno que simplifica el desarrollo de soluciones tecnológicas, mediante la computación embebida, la cual implica la resolución de problemas, a través del modelamiento, basado en conocimientos aplicables como, el control lógico y secuencial, adquisición de datos, comunicaciones seriales, control variable continua, algoritmia e informática, manejo de periféricos⁹.

10.2. Software

En la página oficial del fabricante, se encuentran varios programas para el desarrollo de aplicaciones, unos enfocados a principiantes y el *Mgdstart* que fue con el que se desarrolló el *Firmware*, que es para aplicaciones más robustas.

⁹*Microgrades*, [en línea] <<http://www.tecvolucion.com/>> [Consulta: 19 Jul. 2009]

Figura 32. Software Microgrades.



La última versión del *Mgdstart* es la 2.3.26 y tiene las siguientes características:

- Es de uso libre
- Programación en paquete Gráfico y en Ensamblador
- Realizar programación y emulación *on circuit* por un solo pin
- Desarrollar en una amplia gama de micro-controladores. MCUs HC08 (AP, GP32, SR12, JK1, JK3, JK8, JL3, JL8, QT1, QT2, QT4, y QY4).
- Programar Autómatas, Interfaces Hombre-Máquina y muchos productos MGD sin cambiar el lenguaje, ni programador
- Terminal BIN, HEX, ASCII.

Como se aprecia en la figura del pantallazo de *Microgrades*, hay una caja de Dispositivos que son los que permiten crear la lógica de la programación, en la siguiente figura se hace una pequeña descripción de los componentes más utilizados.

Figura 33. Dispositivos *Microgrades*.

Dispositivos			
		Subir	Todos
FAVORITOS			
SELECTOR DE ESTADO DE PROCESOS			HABILITACIÓN DE UN BLOQUE DE DISPOSITIVO
CAMBIO DE ESTADO DE PROCESO			EJECUCIÓN DE BLOQUE DE DISPOSITIVO EN CASO CONTRARIO
LLAMADO A RUTINA SIN ARGUMENTO			FINAL DEL BLOQUE DE DISPOSITIVO
EJECUCIÓN DE BLOQUE DE DISPOSITIVO EN CASO AND CONTINUO			EJECUCIÓN DE BLOQUE DE DISPOSITIVO EN CASO AND
EJECUCIÓN DE BLOQUE DE DISPOSITIVO EN CASO OR CONTINUO			EJECUCIÓN DE BLOQUE DE DISPOSITIVO EN CASO OR
COPIA DE UN BIT A OTRO			SET = ACTIVAR UN BIT
RETARDO AL TRABAJO CON TIEMPO CONSTANTE			RESET = DESACTIVAR UN BIT
RETADOR AL REPOSO CON TIEMPO CONSTANTE			TOOGLE = CONMUTAR UN BIT
COPIA DE UNA CONSTANE EN UN BYTE			COPIA DE UNA CONSTANTE EN UN ENTERO
COPIA DE UN BYTE EN OTRO			COPIA DE UN ENTERO EN OTRO
LECTURA DE UN BYTE DESDE UNA TABLA			COPIA DE UN BLOQUE DE BYTES EN OTRO
BORRADO DE BLOQUES DE FLASH			GRABACIÓN DE VARIABLES EN FLASH
COMPARADOR DE BYTE MAYOR QUE BYTE			COMPARADOR DE UN BYTE MAYOR QUE CONSTANTE
COMPARADOR DE UN BYTE IGUAL A OTRO BYTE			COMPARADOR DE UN BYTE IGUAL A CONSTANTE
ADICIÓN DE UN BYTE EN UNA CONSTANTE			SUBSTRACCIÓN DE UN BYTE EN UNA CONTANTE
FIJACIÓN DE PLANTILLA PARA VISUALIZACIÓN			VISUALIZACIÓN DE UN BYTE CON PLANTILLA

10.3. Hardware

La descarga del Firmware se realiza con el programador de campo, el cual permite programar los Microcontroladores directamente en el *protoboard* o la tarjeta electrónica en la cual ellos estén instalados y operando. Este módulo permite programar Microcontroladores HC08 en modo monitor y en modo usuario. También permite programar Microcontroladores HCS08 en modo usuario.

Figura 34. Programador de Campo.

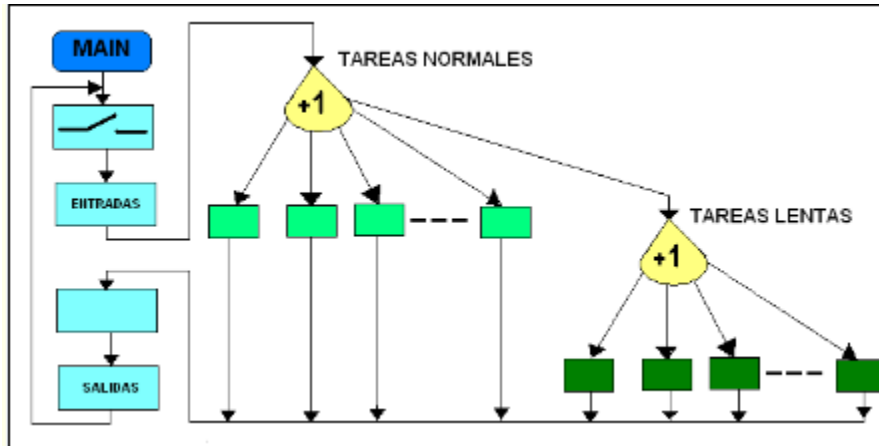


Características

- Indicación de alimentación por LED verde.
- Indicación de programación en modo monitor por LED amarillo.
- Indicación de comunicaciones por LED rojos.
- Conexión con el chip a programar vía *Ribbon* de 10 pines.
- Conexión tipo RS232 opto-aislada para comunicación con PC.
- Trazado de variables en caliente.
- Voltaje de alimentación: 10- 15 VDC.
- Procesadores en modo usuario: HC08, HCS08.
- Procesadores en modo monitor: HC08.
- Velocidad de comunicación: 9600 Baudios
- Voltaje de programación: 8 VDC

10.4. Filosofía *Microgrades*

Figura 35. Estructura Básica del Firmware desarrollado en *Microgrades*.



Fuente: MARTÍNEZ, Juan Carlos. Ayuda De *Microgrades* Versión 2.3.25.

10.4.1. Programación Estructurada

La programación estructurada sugiere que cada parte del programa está representada y desarrollada en varios bloques, otra característica de este tipo de programación es la no existencia de saltos a bloques anteriores, el único salto que existe es una vez se haya recorrido todo el programa, por lo tanto ningún bloque quedará “enganchado” dentro de un ciclo sino que cada bloque dejara fluir libremente el programa.

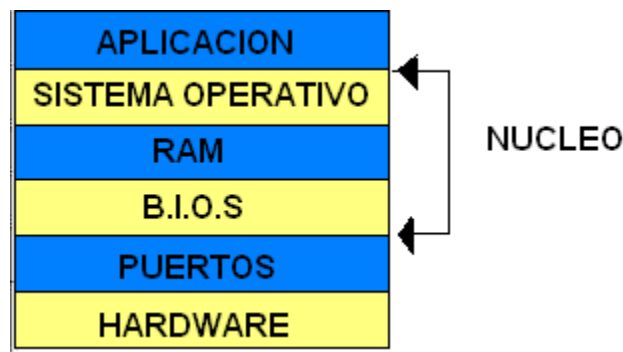
Existen tres tipos de estructuras:

- Estructuras de secuencia: aquellas que cumplen una función específica dentro del programa.
- Estructuras de bifurcación: aquellas que seleccionan que tarea se ejecutara al retomar un nuevo ciclo de programa.
- Estructuras cíclicas: es representada por el programa principal.

10.4.2. Programación Por Capas

Otra de las principales características de *Microgrades* es que su estructura de capas lo convierte en un sistema operativo de tiempo real (RTOS).

Figura 36. Estructura del Sistema Operativo de *Microgrades*



La parte más cercana a la aplicación se llama BIOS (*Basic Input Output System*) que se encarga de leer y/o escribir los puertos a través de la información que se encuentra en la RAM, como por ejemplo, subrutinas de entradas digitales, análogas, manejos de *display*, manejo de teclados, manejo de PWM y otros.

El sistema operativo y la BIOS conforman el KERNEL, el sistema operativo se encarga de hacer procesamientos específicos de la información que llega desde la BIOS y la aplicación que es la capa más alta.

10.4.3. Muestreo y Retención

Se basa en el criterio de que la información se toma y se presenta cada cierto periodo. Su proceso es tomar la información y llevarla a RAM después de un proceso básico, después se procesa, se generan los resultados y se llevan a los

puertos nuevamente, generalmente el muestreo es tomar la información para llevarla a RAM y desde allí ponerla en los puertos.

La retención es guardar la información en la memoria RAM, esto es necesario porque durante el desarrollo de la aplicación se garantiza la estabilidad de la información durante su procesamiento y por lo tanto durante las operaciones la información no cambiara y se evitara *bugs*. Con respecto a las salidas se garantiza no presentarle resultados parciales eliminando la posibilidad de errores.

10.4.4. Tiempo Real

Es el hecho por el cual el Microcontrolador puede responder y estar presto al proceso en cualquier momento y por otro lado las unidades de tiempo como segundos, minutos entre otros.

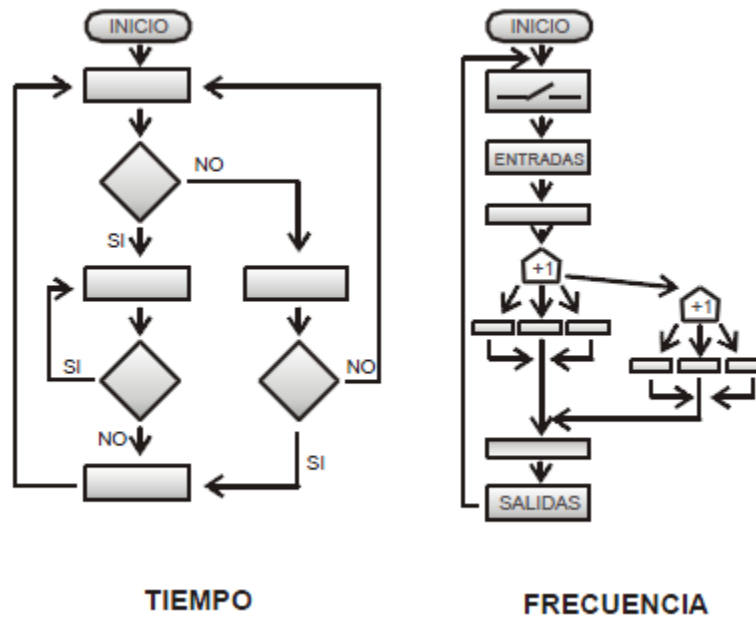
Esto se puede realizar gracias al muestreador ya que este establece una base de tiempo, además el Microcontrolador utiliza un cristal el cual garantiza un ciclo de instrucción estable¹⁰.

10.4.5. Dominio de la frecuencia

Este es el principal concepto del método *Microgrades*, que consiste en generar una estructura de *Firmware*, de tal forma que el Microcontrolador continuamente este revisando todas las tareas y condiciones.

¹⁰ MARTÍNEZ, Juan Carlos. Ayuda De *Microgrades* Versión 2.3.25.

Figura 37. Método convencional y Método Microgrades.



Fuente: *BIS-CONTROL KEY*. Entorno *Microgrades*. [en línea] <Disponible en: http://www.tecvolucion.com/ayudas_manuales.htm> [Consulta: 5 Sep. 2009]

En función del tiempo, si no hay un buen método de programación, por lo general el código espera una condición para ejecutar una acción de salida. Algo que no permite *Microgrades*, por lo que a un programa en función de la frecuencia se le puede agregar cada vez más tareas garantizando su funcionamiento. Además, un programa en el dominio de la frecuencia nos permite evitar que los ruidos afecten la ejecución, por ejemplo, cuando un pulsador genera rebotes; estos rebotes a una frecuencia muy alta son visibles, pero a una frecuencia menor, son imperceptibles a las rutinas de entrada y salida. Si un programa en el dominio de la frecuencia no es capaz de ejecutar todas las tareas a la frecuencia establecida de programa, se recurre a dividir el programa en múltiples tareas.

Existen tareas normales y lentas; cada una de éstas se ejecutará ciertas veces desde la tarea rápida, asumiendo que la tarea normal tiene un periodo igual al periodo de la tarea rápida n veces. Cada vez que se ejecuta una tarea rápida, se

corre una de las tareas que se encuentran de la tarea normal, demostrando así que la tarea rápida siempre tiene una mayor frecuencia que la tarea normal¹¹.

10.4.6. Muestreo Multifrecuencial

Este principio permite tomar entradas o presentar datos a la salida a la frecuencia establecida para cada tarea, por ejemplo que la adquisición análoga venga determinada por la tarea rápida y las salidas digitales en la tarea lenta¹².

¹¹ Entorno *Microgrades*. [en línea] <Disponible en:

http://www.tecvolucion.com/ayudas_manuales.htm> [Consulta: 5 Sep. 2009]

¹² MARTÍNEZ, Juan Carlos. Ayuda De *Microgrades* Versión 2.3.25. [Consulta: 10 Sep. 2009]

11. FIRMWARE

El *Firmware* se desarrollo basado en la filosofía *Microgrades*, dividiendo el programa en varias tareas y administrándolas a una determinada frecuencia.

Para esta aplicación se tienen dos tareas específicas, que son el cambio de canal de acuerdo a la posición geográfica del tren y la comunicación MSK.

La comunicación MSK es de 1200 bps, donde el integrado nos entrega un reloj de 1200 Hz. Para la recepción se sincronizan los datos con cada flanco de bajada, en el momento que haya detección de portadora y para la transmisión se sincronizan los datos con los flancos de subida al habilitar la transmisión.

Según el teorema de Nyquist “La velocidad del muestreo debe ser mínimo al doble de la del proceso”.

$$3 * 1200 \text{ Hz} = 3600 \text{ Hz} \quad (3)$$

De esta forma se determina la tarea rápida, que se aproximó hasta los 4000 Hz.

Para el cambio de canal, se necesita conocer los datos del Receptor GPS que entrega 4800 bits por segundo, y para la aplicación se utiliza una trama de una longitud aproximadamente de 80 caracteres (Mensaje RMC), para garantizar recibir esta cantidad tenemos:

$$\frac{80 * 10}{4800 \text{ bps}} = 166 \text{ ms} \rightarrow 6 \text{ Hz} \quad (4)$$

Se necesitan 166 ms para recibir 80 caracteres de 10 bits cada uno, teniendo en cuenta el bit de *start* y el bit de *stop*. Por lo que no es necesaria una frecuencia

muy alta para realizar el cambio de canal, configurando entonces la tarea normal de 100 Hz.

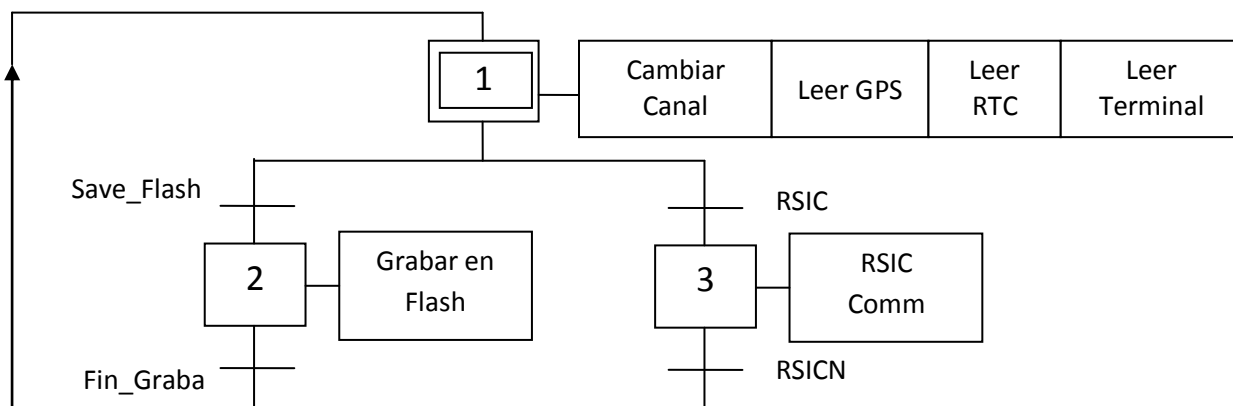
A continuación se ilustra el diseño secuencial *Grafcet* del Firmware.

El GRAFCET (Grafica de Control de Etapas de Transición) es un diagrama funcional normalizado, que permite hacer un modelo del proceso a automatizar, contemplando entradas, acciones a realizar, y los procesos intermedios que provocan estas acciones¹³. En la actualidad se ha universalizado como herramienta de modelado que permite el paso directo a programación.

¹³ WIKIMEDIA FOUNDATION, INC., GRAFCET. [en línea] <Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/GRAFCET>> [Consulta: 10 Sep. 2009]

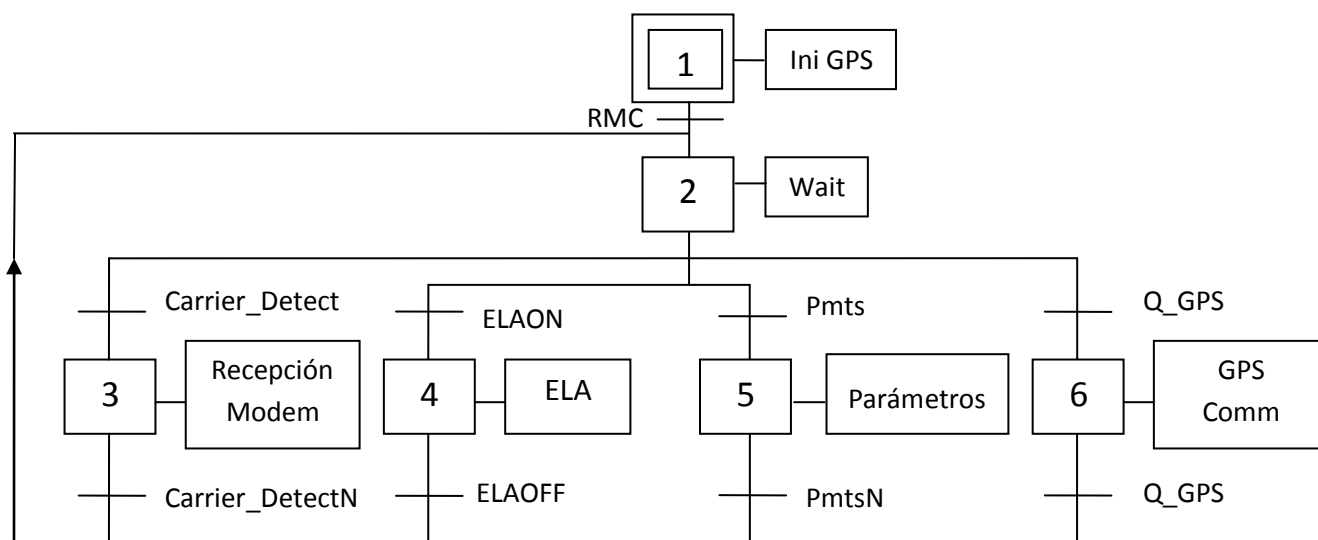
11.1. Diagrama Grafcet de la tarea Normal (100 Hz)

Figura 38. Diagrama Grafcet de la Tarea Normal.



11.2. Diagrama Grafcet de la tarea Rápida (4000 Hz)

Figura 39. Diagrama Grafcet de la Tarea Rápida.



12. APLICACIÓN RSIC GPS

Con el fin de que los usuarios interactúen con el equipo y puedan modificar o actualizar determinados parámetros, se desarrollo la aplicación RSIC GPS (*Radio System Integration and Configuration GPS*).

La aplicación se desarrollo en C#.NET, siendo un lenguaje de programación de uso general sencillo, con seguridad de tipos y orientado a objetos.

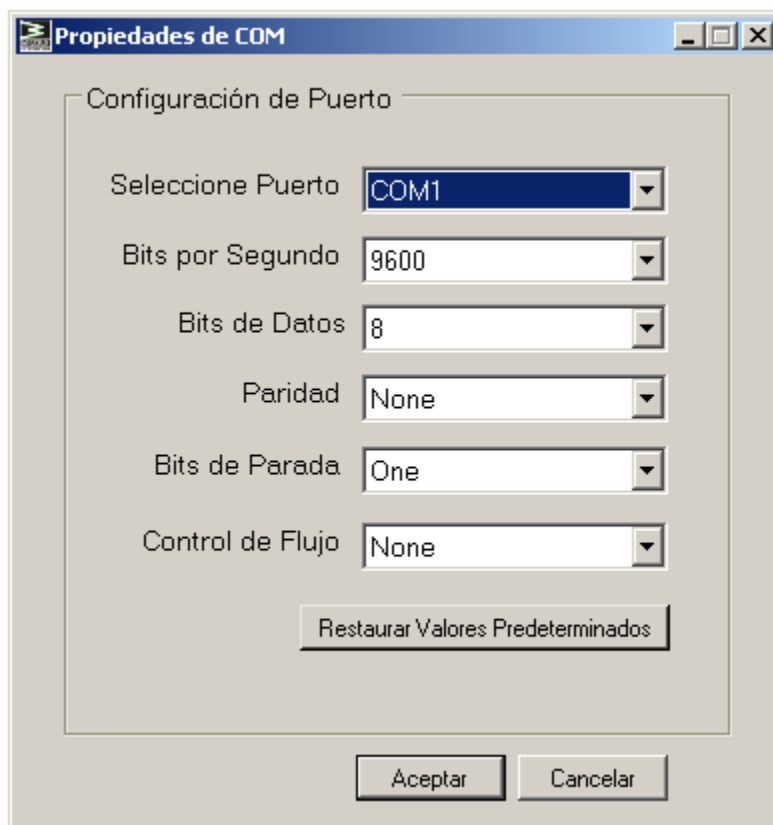
Visual C# ofrece a los desarrolladores herramientas eficaces centradas en código y compatibilidad de lenguajes para crear aplicaciones web y cliente completas y conectadas en .NET Framework¹⁴. C# combina lo mejor de los lenguajes de Visual Basic, C++ y Java, siendo un lenguaje sencillo e intuitivo, con la desventaja de que está ligado a Microsoft.

12.1. RSIC GPS

La comunicación con el *Carlink* se realiza a través del puerto serial, por lo que primero debe seleccionarse el puerto por donde se establecerá la comunicación.

¹⁴ Microsoft Corporation. Centro de desarrolladores de Visual C#, [en línea] <Disponible en <http://msdn.microsoft.com/es-es/vcsharp/default.aspx>> [Consulta: 15 Sep. 2009]

Figura 40. Configuración del puerto RSIC GPS.

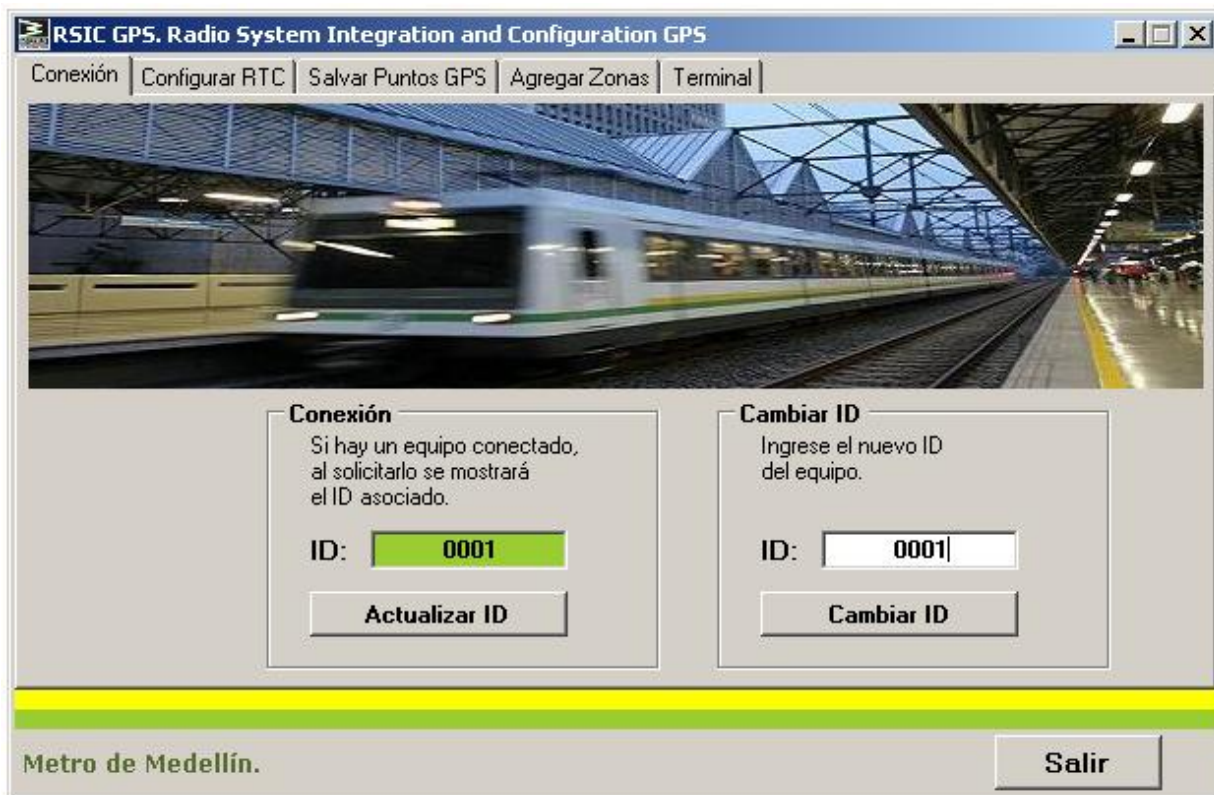


Luego aparece la aplicación como tal, donde se encuentran varias pestañas, que nos permiten realizar modificaciones y lecturas al equipo.

12.2. Conexión

En la pestaña de Conexión, podemos indagar al equipo de la identificación que tiene configurada, además de modificarla si es necesario.

Figura 41. Pestaña de Conexión del RSIC GPS.

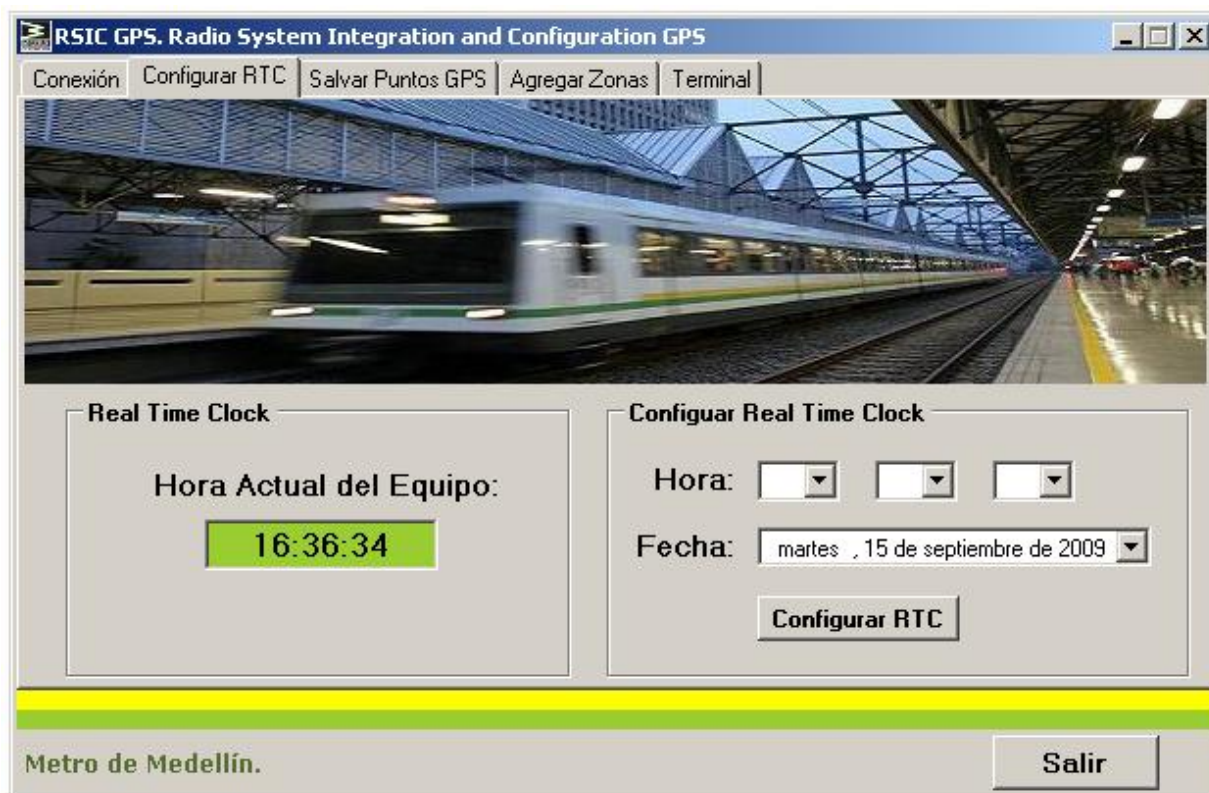


12.3. Configuración RTC

El *Carlink* tiene un RTC, con el fin de mantener la hora actual, en caso de que en algún momento haya pérdida de satélite por parte del GPS. Además de ayudar en la inicialización del GPS, cuando se realice un arranque en Frio.

Cuando se pasa a la pestaña de Configurar RTC, se muestra la hora que el equipo tiene actualmente configurada e igualmente en caso de ser necesario, se deben ingresar los datos correspondientes para modificarla.

Figura 42. Pestaña de Configuración RTC del RSIC GPS.



12.4. Salvar Puntos GPS

En caso de que se quiera hacer un recorrido por la línea tomando medidas de GPS, la aplicación permite salvar puntos exactos en el instante que se requiera, esto pensando en si el recorrido se hace en tren, donde el usuario puede salvar los puntos que necesite, registrando valores de latitud, longitud, velocidad, e ingresando la inter-estación donde se tomaron los datos y el canal que se quiera configurar en la zona, facilitando después copiar estos datos e ingresarlos en la pestaña de agregar zonas.

Figura 43. Pestaña de Salvar Puntos GPS del RSIC GPS.

The screenshot shows the 'RSIC GPS. Radio System Integration and Configuration GPS' application window. The 'Salvar Puntos GPS' tab is active. The 'Ingresar Datos' section has 'Interestación' set to 'Ace-Tri' and 'Canal' set to '2'. The 'Visualizar Datos' section shows 'Latitud: 0619.624 N', 'Longitud: 07533.245 W', 'Velocidad: 0 K', and 'Hora: 21:53:21 UTC'. Below these is an 'Agregar Datos' button. A table displays the saved data point. At the bottom, it says 'Metro de Medellín.' and has a 'Salir' button.

	Interestación	Canal	Latitud	Longitud	Velocidad	Hora
▶	Ace-Tri	2	0619.624	07533.245	0	21:52:04
*						

12.5. Agregar Zonas

La pestaña de Agregar Zonas, nos muestra las líneas del metro y las zonas que tiene por defecto el equipo, indicando con líneas punteadas las posibles zonas futuras que pueden ser creadas, ingresando las latitudes que delimitan estas zonas, además de la posición de memoria que van a ocupar en el Microcontrolador y el canal que se quiere sintonizar en esta zona.

Al configurar alguna zona la información queda registrada en la base de datos, para tener control de los nuevos parámetros que se están ingresando al equipo.

Figura 44. Pestaña de Agregar Zonas GPS del RSIC GPS.

RSIC GPS. Radio System Integration and Configuration GPS

Conexión | Configurar RTC | Salvar Puntos GPS | **Agregar Zonas** | Terminal

Z: Zonas

Configuración Zonas
Ingrese las latitudes que delimitan la nueva zona:

Desde: 0608.000 Hasta: 0500.000

Posición de Memoria: 0 Eliminar Posición

Posición de Canal: 06 Configurar Zona

	Posición de Memoria	Canal	Desde	Hasta
▶	0	6	0608.000	0500.000
*				

Metro de Medellín. Salir

12.6. Terminal

Por último se desarrollo un terminal, con el fin de registrar más datos a comparación de la pestaña de salvar puntos GPS, ya que no solo permite conectarse con el *Carlink* sino que tiene la opción de comunicarse directamente con el GPS de *Tyco* y ver las demás tramas que arroja el GPS (Ver figura 46). Se encuentra un botón ON/OFF que se encarga prender y apagar la recepción de mensajes, el botón RMC para activar la trama RMC que por defecto está apagada cuando arranca el GPS; el botón Guardar datos, donde se almacena todo lo registrado como archivo texto, un botón para escribir los comandos GPS, y por ultimo un botón que nos permite inicializar el GPS en una posición específica que se agrega en los campos de latitud y longitud.

Figura 45. Pestaña de Terminal GPS del RSIC GPS

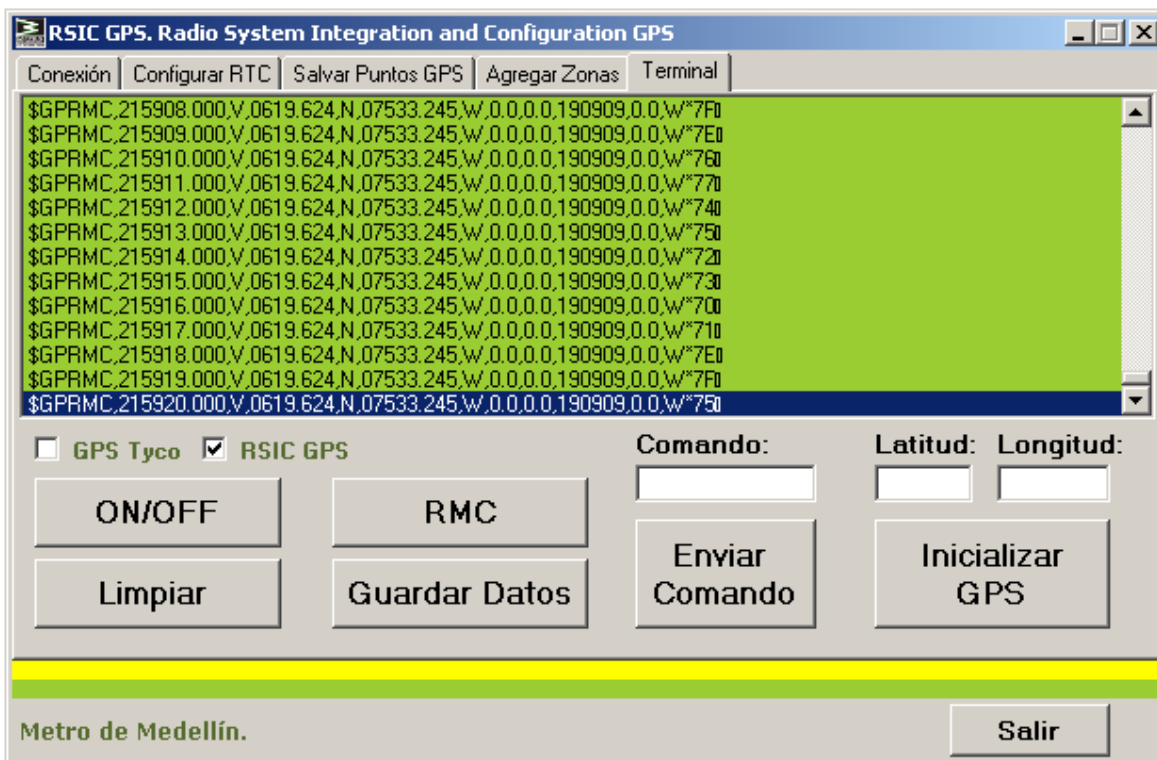
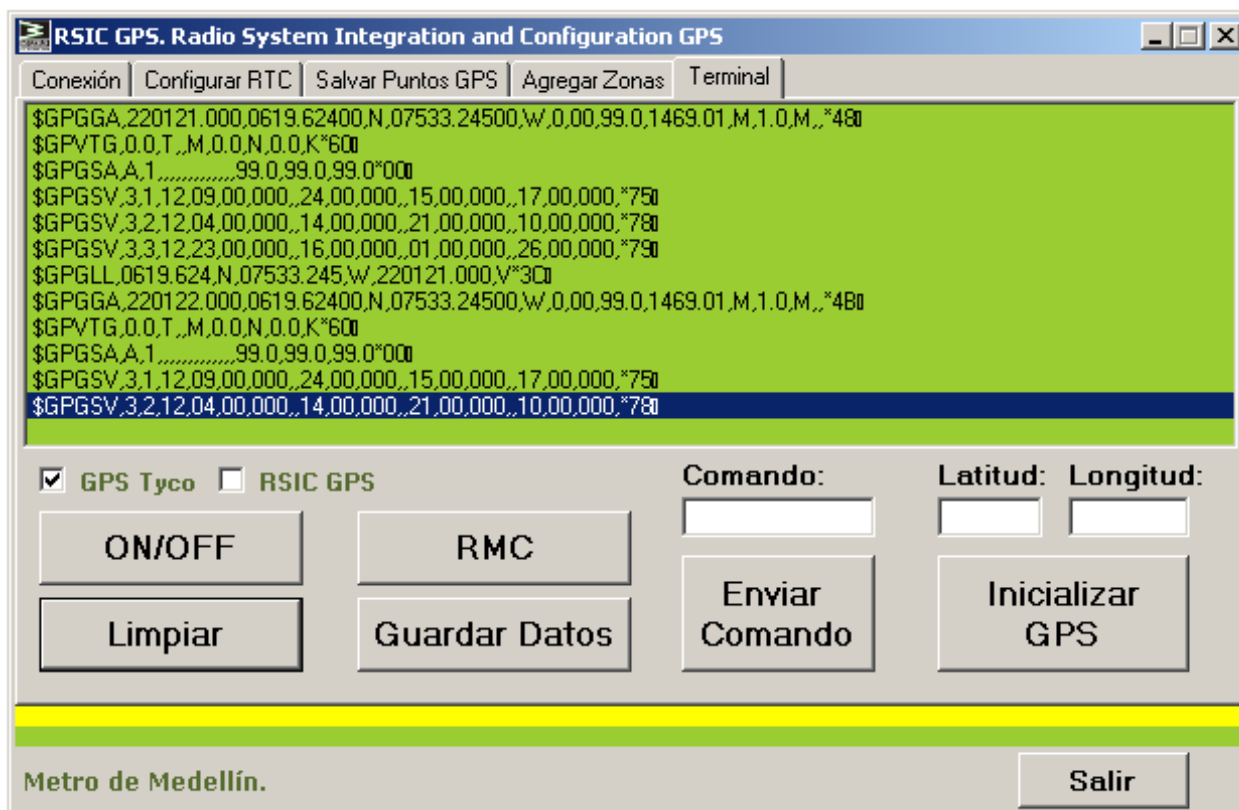


Figura 46. Pestaña de Terminal con la opción GPS Tyco del RSIC GPS.



CONCLUSIONES

- Al iniciar el desarrollo del prototipo, fue necesario realizar un estudio de todo el sistema y de los manuales existentes del equipo actual, donde se pudo obtener información importante, pero no detallada de cómo se lograba el funcionamiento e interacción con los demás equipos de la configuración. Por lo que a partir de un equipo accesible, se empezó a sacar información de cómo estaba hecho, los componentes electrónicos que lo conforman, como había sido fabricado y como era físicamente su funcionamiento, logrando analizar el equipo en detalle, aplicando el método de ingeniería inversa.
- Luego de tener claridad sobre el funcionamiento, se paso a estudiar cada uno de los componentes electrónicos que conforman el desarrollo, para mirar posibles alternativas, encontrando Receptores GPS, mucho más precisos y en el mercado local, aunque actualmente, la demanda de receptores GPS es mucha y se pueden encontrar mejores alternativas; se opto por un Microcontrolador AP16 de Motorola que se ajustaba a las necesidades del proyecto además que permite el desarrollo del firmware en *Microgrades* que tiene una filosofía interesante de programación. Y por último se contacto directamente a los fabricantes del integrado encargado de la comunicación MSK, quien ofrecieron más alternativas pero con mas funciones por lo que se sobredimensionados el prototipo, optando entonces por desarrollar la comunicación con el chip actual.
- Para el desarrollo del PCB, se realiza un estudio detallado de las hojas de datos de cada componente, donde se brinda en detalle la información del comportamiento y configuración, además cabe destacar la importancia de consultar las notas de aplicación que ofrecen las páginas de los fabricantes siendo de mucha ayuda para obtener una configuración optima del modem MSK.

- Para aplicar ingeniería inversa, es necesario contar con equipos adecuados y actuales, como en este caso se pudo contar con el analizador lógico *Digiview*, facilitado por el laboratorio de electrónica de la empresa Metro de Medellín, dado a la versatilidad de comunicación que ofrece el modem MSK, donde lo único que se conoce es como se realiza la sincronización de los datos, pero cada fabricante es libre de desarrollar su propio protocolo, sometiendo entonces el equipo a capturas físicas, tomando nota de los valores arrojados por el software del analizador, siendo procesadas, y descubriendo la forma como el equipo envía y recibe los datos.
- Se desarrollo un firmware optimo y de gran estabilidad, gracias a la filosofía de *Microgrades* repartiendo tareas y asignándole la frecuencia respectiva, logrando una efectiva utilización de recursos del Microcontrolador, además de una programación de entorno grafica muy amigable con el usuario y con la generación del código ensamblador que entrega un código liviano a comparación de otros lenguajes que pueden llegar a saturar las tareas del Microcontrolador.
- La Implementación del modem MSK, permite la transmisión de datos vía radio, siendo de gran importancia para la empresa Metro de Medellín disponer de una forma rápida y sencilla de comunicación con los trenes.
- El desarrollo de la aplicación RSIC, es la mejor forma en que el usuario puede interactuar con el equipo, se implemento una adecuada interfaz muy intuitiva y fácil de manejar logrando comodidad para configurar y actualizar parámetros del equipo.
- Para un sistema tan masivo como el Metro de Medellín es de vital importancia el correcto funcionamiento de toda la infraestructura de comunicaciones, por lo que se logra un prototipo robusto y confiable, satisfaciendo las necesidades actuales del sistema.

RECOMENDACIONES

La confiabilidad del GPS es de vital importancia en el correcto funcionamiento del equipo, de allí la necesidad de contar con un receptor confiable, tanto en precisión como en el tiempo que tarda, en capturar el primer arreglo valido. Las características del receptor GPS de *Tyco*, lo hacen un receptor confiable, con el que se puede adquirir 3 m de precisión al captar la máxima cantidad de satélites, que son 12 específicamente. Las primeras pruebas que se hicieron del equipo, no fueron satisfactorias en cuanto al tiempo que tardaba el receptor en arrojar información valida, pues en espacio abierto llegó a tardar hasta 7-10 minutos. Se realizaron varias pruebas y se pudo comprobar un mejor funcionamiento, ubicando la antena en lo más alto posible, de esta forma se están evitando reflexiones que distorsionan los datos modulados en la portadora y la fase de la señal.

Esta recomendación se da para el caso de la antena que viene con el receptor, que es del mismo fabricante *Tyco*, pero en las últimas pruebas se pudo comprobar una disminución significativa en el tiempo de enganche (*Cold Start*, 1 minuto aproximadamente), utilizando las antenas receptoras que tienen los trenes actualmente, por lo que se recomienda totalmente implementar el equipo con estas antenas.

BIBLIOGRAFÍA

A.V.L DE COLOMBIA. Manual de Usuario del Software AVL. Bogotá: AVL de Colombia, 2002. 17 p.

A.V.L. DE COLOMBIA. VISION & CONTROL - MANUAL DEL USUARIO, 2002. 17p.

ESPITIA GUERRA, Asdrúbal. Manual *C@mlink* Radio. Bogotá: A.V.L de Colombia, 2002. 55 p.

GARCÍA MEJÍA, Jaime Andrés. Integración de sistema de comunicaciones con sistema de gestión de tráfico para los trenes en el metro de Medellín Ltda. Medellín, 2007. Tesis (Ingeniero Electrónico). UPB. Escuela de ingeniería.121 p.

ISEC. PROYECTO METRO DE MEDELLÍN. Sistema De Radio Móvil Motorola 7100, Vehículos De Pasajeros, Vehículos Auxiliares.

ISEC. Reposición del Sistema de Radiocomunicaciones operativas del Metro, 2002. 78 p.

LAURIE TETLEY, DAVID CALCUTT. Electronic Navigation Systems. ISBN 0750651385, 9780750651387. 448 páginas. (2001).

MARTÍNEZ, Evelio. Sistema Mundial de Localización por Satélite (GPS). Publicado en la Revista RED, Enero de 1998. <Disponible en [<http://www.eveliux.com/mx/sistema-mundial-de-localizacion-por-satelite-gps.php>]> [Consulta: 20 Ago. 2009]

METRO DE MEDELLÍN. Manual de Servicio de Transporte. Anexo 10.6 Protocolo de Comunicaciones y anuncios por altavoces. 2007, 50 p.

METRO DE MEDELLÍN. Manual de Servicio de Transporte. Comunicaciones en el Servicio de Operación (RO Cap 10). MST-110, 2008, 42 p.

MICROSOFT CORPORATION. Centro de desarrolladores de Visual C#, [en línea] <Disponible en <http://msdn.microsoft.com/es-es/vcsharp/default.aspx>> [Consulta: 15 Sep. 2009]

MX.COM, INC. Mixed Signal ICs, *Application*. MSK and its Application to Wireless Data Transmission, 1997. 31 p.

Posicionamiento y Navegación Global mediante Satélites [en línea] <Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos19/navegacion-global/navegacion-global.shtml>> [Consulta: 20 Ago. 2009]

WIKIMEDIA FOUNDATION, INC., GRAFCET. [en línea] <Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/GRAFCET>> [Consulta: 10 Sep. 2009]

WIKIMEDIA FOUNDATION, INC., Sistema de Posicionamiento Global. [en línea] <Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global> [Consulta: 20 Ago. 2009]

ANEXOS