



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GPS DIFERENCIAL PARA
AUMENTAR LA PRECISIÓN DE LOS SISTEMAS DE
UBICACIÓN BASADOS EN LA TECNOLOGÍA GPS SOBRE
DISPOSITIVOS MÓVILES**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
como parte de los requisitos para optar al título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR:

Gustavo Alfredo Puglia Costas

José Rafael Monagas Mendoza

TUTOR:

Ing. Javier Barrios

FECHA:

Caracas, Marzo de 2012



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GPS DIFERENCIAL PARA
AUMENTAR LA PRECISIÓN DE LOS SISTEMAS DE
UBICACIÓN BASADOS EN LA TECNOLOGÍA GPS SOBRE
DISPOSITIVOS MÓVILES**

REALIZADO POR:

Gustavo Alfredo Puglia Costas

José Rafael Monagas Mendoza

TUTOR:

Ing. Javier Barrios

FECHA:

Caracas, Marzo de 2012

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GPS DIFERENCIAL PARA AUMENTAR LA PRECISIÓN DE LOS SISTEMAS DE UBICACIÓN BASADOS EN LA TECNOLOGÍA GPS SOBRE DISPOSITIVOS MÓVILES.

Puglia Costas, Gustavo Alfredo Gpuglia88@gmail.com

Monagas Mendoza, José Rafael jrafamonagas@gmail.com

Resumen

El sistema de navegación predominante a nivel mundial es el G.P.S. A pesar de las numerosas virtudes que ofrece esta técnica, muchas aplicaciones requieren de mayor precisión que la que éste puede ofrecer. Entre las distintas metodologías existentes para mejorar esta precisión se encuentra la de G.P.S. diferencial (D.G.P.S.), en la cual una estación fija difunde a los receptores las correcciones que deben hacer en sus mediciones, para de esta manera mejorar la exactitud. Este Trabajo Especial de Grado (TEG) lleva como objetivo el de desarrollar un sistema de D.G.P.S. aplicado a teléfonos móviles.

Para lograr esto se trazaron una serie de objetivos, los cuales se alcanzaron siguiendo las pautas de la metodología planteada, que estipuló primero una investigación de todos los conocimientos relacionados. Luego se hizo un estudio para confirmar los valores que establecía la teoría sobre el error del G.P.S., y también para tener referencias de comparación con lo que se lograría en el sistema desarrollado. Posteriormente se procedió a diseñar, construir e implementar dicho sistema, para por ultimo realizar las pruebas que permitieron comprobar la consecución de los objetivos planteados.

Como resultado de los lineamientos antes descritos, se logró implementar el sistema planteado, el cual se presenta en este Trabajo Especial de Grado como una alternativa de bajo costo, que permite aumentar las funcionalidades del sistema G.P.S. en dispositivos de telefonía móvil.

Palabras clave: G.P.S., D.G.P.S., correcciones, procesador de datos, terminal móvil y terminal de referencia.

Agradecimientos

Agradezco a todos mis compañeros, que me han acompañado durante estos cinco arduos años de carrera. A @EDUARDOBLANCO y @charliebrewer sin cuyo aporte este trabajo no hubiera sido posible. A los profesores Javier Barrios, tutor de este trabajo y principal promotor del convenio con North Carolina State University, y al profesor de dicha universidad Mihail Sichitiu, la ejemplificación de todas las cualidades que debería reunir un ingeniero. Al coautor de este trabajo @JRafaMM. A mi familia. Gracias a todos.

Gustavo Alfredo Puglia Costas.

A todos mis compañeros, @Rosalia_Perez, @javierval1, @adricss, y Álvaro González, y especialmente a @gaboguti, que me han acompañado durante mi carrera universitaria. A @EDUARDOBLANCO y @charliebrewer sin cuyo aporte este trabajo no hubiera sido posible. A los profesores Javier Barrios, tutor de este Trabajo Especial de Grado, y principal promotor del mismo, de quien siempre recibimos apoyo, y quien hizo que este proyecto fuese posible. Un especial agradecimiento de igual manera al profesor Mihail Sichitiu, quien ha influido de gran manera en nuestra formación y visión de futuro que tenemos como estudiantes de ingeniería y futuros ingenieros. Y finalmente, un agradecimiento al coautor de este trabajo @gustavopuglia. Para finalizar, un agradecimiento a mi familia, por el apoyo incondicional que me han dado durante toda la carrera. Gracias a todos.

José Rafael Monagas Mendoza.

Índice General

Resumen	I
Agradecimientos	II
Índice General	III
Índice de Figuras.....	VII
Índice de Tablas	IX
Introducción.....	X
Capítulo I.....	1
Planteamiento del Proyecto	1
I.1 Planteamiento del Problema	1
I.2 Objetivos	5
I.2.1 Objetivo General	5
I.2.2 Objetivos Específicos	5
I.3 Alcances y limitaciones.....	6
I.4 Justificación.....	7
Capítulo II	8
Marco Referencial.....	8
II.1 <i>Global Positioning System G.P.S.</i>	8
II.2 Arquitectura del sistema G.P.S.....	10
II.2.1 Módulo de control.....	10
II.2.2 Módulo espacial.....	11
II.2.3 Módulo usuario	13
II.3 Señal GPS	14
II.3.1 Transmisión de la señal SPS.....	14

II.3.2 Contenido de la señal	16
II.4 Errores del sistema GPS.....	17
II.4.1 Error del reloj del satélite	17
II.4.2 Errores en los parámetros orbitales	18
II.4.3 Errores relativos a la propagación de la señal	18
II.4.4 Pérdida de ciclos	18
II.4.5 Efecto multiruta	19
II.5 <i>Differential</i> G.P.S.	19
II.5.1 Errores involucrados en corrección D.G.P.S.	22
II.5.2 Tipos de Implementaciones de D.G.P.S.....	22
II.5.2.i Ranging-Code D.G.P.S.....	23
II.5.2.ii Diferencia Sencilla Entre Receptores.....	24
II.5.2.iii Doble Diferencia Observable	25
II.5.3 D.G.P.S. en tiempo real.	26
II.5.4 Postprocesamiento de correcciones.	26
II.5.5 Procesamiento de datos en tiempo real.	27
II.6 Incremento en la precisión del sistema G.P.S. civil.	28
II.7 Sistemas de comunicación aplicados en D.G.P.S.....	28
II.8 Métodos de comunicación entre base de referencia y usuario.	29
II.9 Wi-Fi™ (<i>Wireless Fidelity</i>)	30
II.10 Bluetooth™	31
Capítulo III	33
Metodología.....	33
III.1 Fase de documentación.....	34

III.2 Fase de estudio y diseño.	34
III.3 Fase de implementación.	35
III.4 Fase de pruebas.	36
Capítulo IV	37
Desarrollo	37
IV.1 Fase de documentación	37
IV.2 Fase de estudio y diseño	41
IV.3 Fase de implementación	44
IV.3.1 Terminal de referencia	44
IV.3.2 Terminal móvil	45
IV.3.3 Procesador de datos	46
IV.3.3.i Módulo de sincronización y manejo del terminal de referencia.	47
IV.3.3.ii Módulo de sincronización y manejo de los terminales móviles.	49
IV.3.3.iii Corrección de datos.	50
IV.3.3.iiii Mapeo de ubicaciones.....	51
IV.4 Fase de pruebas	51
Capítulo V	53
Resultados	53
V.1 Datos del funcionamiento del equipo G.P.S. y estudio de los mismos.	53
V.2 Sistema de comunicación y sincronización.	60
V.2.1 Terminal de Referencias	61
V.2.2 Terminal Móvil.....	62
V.2.3 Procesador de datos	63

Capítulo VI.....	71
Conclusiones y Recomendaciones.....	71
Referencias Bibliográficas	74
Apéndice A.....	76
Pruebas adicionales sobre el sistema	76

Índice de Figuras

Figura 1: Diseño de funcionamiento planteado para el sistema propuesto.	4
Figura 2: Diferencia entre receptores.....	24
Figura 3: Ecuación de Diferencia Sencilla Observable.	24
Figura 4: Ecuación de Doble Diferencia Observable.	25
Figura 5: Ecuación de Ley de propagación de errores.....	26
Figura 6: Método de corrección aplicado.....	39
Figura 7: Cálculo de correcciones realizado.	40
Figura 8: Ecuación de cálculo de distancia entre coordenadas.	48
Figura 9: Interfaz Gráfica. Terminal de Referencias.	61
Figura 10: Interfaz Gráfica. Terminal Móvil.....	62
Figura 11: Comunicación entre Terminal de Referencias y Procesador de Datos.	63
Figura 12: Comunicación entre Terminal Móvil y Procesador de Datos.	64
Figura 13: Interfaz Gráfica. Procesador de Datos.	65
Figura 14: Corrección 1. Posición G.P.S. (Naranja). Posición Corregida (Morado). 67	
Figura 15: Interfaz Gráfica. Programa de Mapeo de Posiciones.	67
Figura 16: Corrección 2. Posición G.P.S. (Naranja). Posición Corregida (Morado). 69	
Figura 17: Primera prueba. Coordenadas reales: 10.491982, -66.808172.....	76
Figura 18: Segunda prueba. Coordenadas reales: 10.423073, -66.810619.....	76

Figura 19: Tercera prueba. Coordenadas reales: 10.413368, -66.835831. 77

Figura 20: Cuarta prueba. Coordenadas reales: 10.469157, -66.866481..... 77

Índice de Tablas

Tabla 1: Recolección de datos de G.P.S. Condiciones de lluvia.....	54
Tabla 2: Operación del sistema G.P.S. bajo techo.....	55
Tabla 3: Pruebas G.P.S. realizadas en el mismo punto a diferentes horas del día.	56
Tabla 4: Estabilidad del sistema. Prueba 1.....	57
Tabla 5: Estabilidad del sistema. Prueba 2.....	58
Tabla 6: Estabilidad del sistema. Prueba 3.....	58
Tabla 7: Comportamiento de diferentes modelos de módulos G.P.S.	59

Introducción

Existen numerosos sistemas de navegación, los cuales tienen como principal funcionalidad la de proporcionar al usuario la posición en la que él se encuentra. Uno de estos sistemas de navegación es el “*Global Positioning System*”, conocido como GPS.

Creado por el Departamento de Defensa de EEUU en 1973, y completamente operacional en 1994, el sistema G.P.S. es sin lugar a duda el más utilizado globalmente. Desarrollado para superar limitaciones que presentaban otros sistemas de navegación, GPS cuenta con 24 satélites que están constantemente enviando información, que los receptores interpretan para calcular valores como su posición, altitud y hora.

El sistema G.P.S. está disponible tanto para uso militar como para uso civil. Por motivos de seguridad, la precisión que ofrece el sistema a nivel civil es mucho menor comparada con la que puede ofrecer para aplicaciones militares, llegando a tener a nivel civil una apreciación de 5 metros, a diferencia de la precisión milimétrica que proporciona el sistema para uso oficial, esto sin considerar la influencia de cualquier factor externo.

Para numerosas aplicaciones dependientes del GPS, en el ámbito civil, esta cifra de error es inadmisibles. Es por ello que se ha buscado desarrollar métodos auxiliares que mejoren su exactitud. Uno de los cuales es el *Differential GPS* (DGPS) o GPS diferencial, el cual se basa en el principio de que si dos receptores están próximos geográficamente, entonces ambos experimentan el mismo error. Mediante una red de estaciones fijas y en posiciones conocidas, se calcula la diferencia entre la posición que proporcionan los satélites y la posición real. Este cómputo se difunde a todos los receptores para que hagan las correcciones pertinentes a sus mediciones.

Este Trabajo Especial de Grado (TEG) se plantea como objetivo el de desarrollar un sistema de GPS diferencial aplicado a dispositivos móviles, para mejorar la exactitud de los módulos GPS de dichos dispositivos.

Para cumplir con dicha finalidad se ha planteado una clara metodología, la cual empieza sobre una revisión bibliográfica de los conceptos relacionados con GPS y DGPS, de manera de conocer a fondo sobre el tema, seguido de un estudio que compruebe los valores de error nominal de GPS.

Posteriormente se procederá a construir el sistema deseado. Empezando por el diseño, en donde se definirá la arquitectura y todos los demás parámetros a tener en consideración. Culminando con la programación de los códigos en cada uno de los equipos, para tener al final de todos estos procesos, un sistema completamente funcional.

Como último paso en este TEG, se harán todas las pruebas que permitan comprobar y medir la efectividad del sistema desarrollado.

El desarrollo del proyecto está documentado en seis capítulos. El capítulo I contiene el planteamiento del proyecto, los objetivos a cumplir, los motivos que justifican la realización del trabajo y la descripción de los alcances y limitaciones que perfilaron el trabajo. El capítulo II presenta el estudio y la documentación teórica que respalda la investigación. En el capítulo III está compuesto por la metodología que se utilizó para cumplir con los objetivos planteados. El capítulo IV contiene el desarrollo del proyecto. El capítulo V expone las pruebas y los resultados de la implementación del sistema diseñado. El capítulo VI muestra las conclusiones y recomendaciones obtenidas.

Capítulo I.

Planteamiento del Proyecto

A continuación se expone la serie de observaciones que dieron origen a éste Trabajo Especial de Grado, así como las razones que justifican la profundización y el desarrollo del tema. Además se menciona la extensión y los factores limitantes del proyecto

I.1 Planteamiento del Problema

Las necesidades de implementación de un sistema de ubicación han venido aumentando estrepitosamente en los últimos años, y con ellas la necesidad de la evolución de estos mismos para mejorar los niveles de exactitud y precisión.

Existen infinidad de aplicaciones con las que se puede trabajar con precisiones como las que brinda el equipo G.P.S. comercial, que pueden presentar márgenes de error de más de 20 metros en situaciones adversas, ya que lo que se quiere tener es una idea clara pero no exacta de la ubicación actual de un objeto, como sucede en los sistemas de navegación comercial para vehículos de transporte terrestre.

De esta misma manera, un gran número de aplicaciones van requiriendo niveles más precisos, ya que en un área de cinco metros a la redonda (error promedio de un módulo de G.P.S.), se pueden encontrar una infinidad de posibles lugares distintos al que se está buscando. Esto puede suceder en fuentes minerales subterráneas, o excavaciones arqueológicas, asimismo como aplicaciones de navegación de alta precisión como pueden ser navegaciones aéreas, incluso maniobras de aterrizaje y/o despegue asistidos, y muchas otras aplicaciones, para las cuales la ubicación no sirve de mucho, si la misma no se da con una alta precisión.

Por otro lado, El G.P.S. (Global Positioning System) es el sistema de posicionamiento más utilizado en la actualidad.

El sistema G.P.S. es un sistema de posicionamiento global que está compuesto por 24 satélites, distribuidos alrededor de la tierra, utilizando como referencia la línea del ecuador. Esto hace que a medida que un receptor G.P.S. se va acercando a los polos, su precisión disminuye, haciendo que los datos emitidos sean menos confiables. La razón de esto, es que la precisión y la fiabilidad de los cálculos hechos por un receptor G.P.S. dependen del número de satélites que tengan visión directa con este receptor en un momento dado, ya que mientras más datos tenga el módulo de usuario para calcular su ubicación, más precisa será esta.

Un satélite del sistema G.P.S. emite información constantemente para que los receptores puedan actualizar su ubicación con una alta frecuencia, permitiendo así, además del cálculo de la posición geográfica, dar un aproximado de la velocidad a la que se está viajando, así como de la dirección en la que se traslada. Estos paquetes de datos que emite un satélite contienen dos tipos de información, una que es aprovechable por cualquier receptor de uso civil, y otro segmento que solo puede ser decodificado por los receptores militares del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (en adelante U.S.D.O.D.), los cuales permiten una precisión mucho mayor que los receptores comerciales, llegando a tener un margen de error medible en unidades de milímetros.

Para un G.P.S. de uso civil, el margen de error puede alcanzar cinco metros, e inclusive más, dependiendo de muchos factores involucrados en este cálculo. De ser aplicado un receptor de este tipo en un sistema de rastreo de fosas petrolíferas, la perforación podría tener una inexactitud tan alta que probablemente el proyecto podría llegar a fracasar.

El margen de error total de un receptor de G.P.S. civil, incluyendo el error originado por la cantidad de satélites que se pueden captar, el originado por las

condiciones climáticas que deterioran y retrasan la señal, puede ser disminuido de varias maneras.

Una manera de mejorar la precisión del sistema de posicionamiento es utilizando la tecnología del G.P.S. diferencial. El cual consiste en complementar el sistema de ubicación por G.P.S. aplicado en el receptor móvil, con un receptor fijo que utilice el mismo sistema de ubicación, (receptor también conocido como base diferencial) y que conozca su ubicación exacta, utilizando un método de cálculo de ubicación distinto al sistema G.P.S. A partir del error que se puede calcular en el receptor fijo, conociendo su ubicación según el sistema GPS, y su verdadera ubicación, se puede calcular y corregir el error que se presente en el receptor móvil. Esta corrección diferencial se puede aplicar, siempre y cuando los dos receptores involucrados se encuentren dentro de un mismo rango (que va a depender de muchos factores, como su ubicación geográfica, y la topología del terreno), que permita que los satélites captados por ambos sean los mismos, asegurándose así, de que el error a corregir sea el mismo

Por otro lado, se puede señalar la versatilidad que ofrecen los sistemas operativos móviles actuales, sumados a la gran cantidad de usuarios que los utilizan y que van aumentando cada día. Este factor impone una importancia extra sobre el proyecto a realizar, ya que el sistema de precisión mejorada de ubicación podría ser utilizado en múltiples dispositivos, y en situaciones bastante diferentes, como pueden ser estudios de terreno alrededor de una granja, o rastreo de animales dentro de un área determinada.

El sistema que se propone en el presente proyecto de tesis, funcionaría con un terminal móvil puesto como base de referencia diferencial, el cual se comunicaría directamente a la base de procesamiento de los cálculos diferenciales. Un segundo terminal móvil, el cual funcionaría como el módulo usuario G.P.S. al cual se le aplicarían las correcciones diferenciales, las que a través de señales radio de algún tipo, enviaría todos sus datos de posicionamiento recibidos por la red de satélites

visibles G.P.S., al terminal fijo (terminal móvil fijado como base), para luego ser comparados con los datos correccionales procesados y así poder realizar los ajustes de precisión de la señal. En la base de procesamiento de correcciones se almacenaría toda la información de movimiento del módulo utilizado como módulo G.P.S.

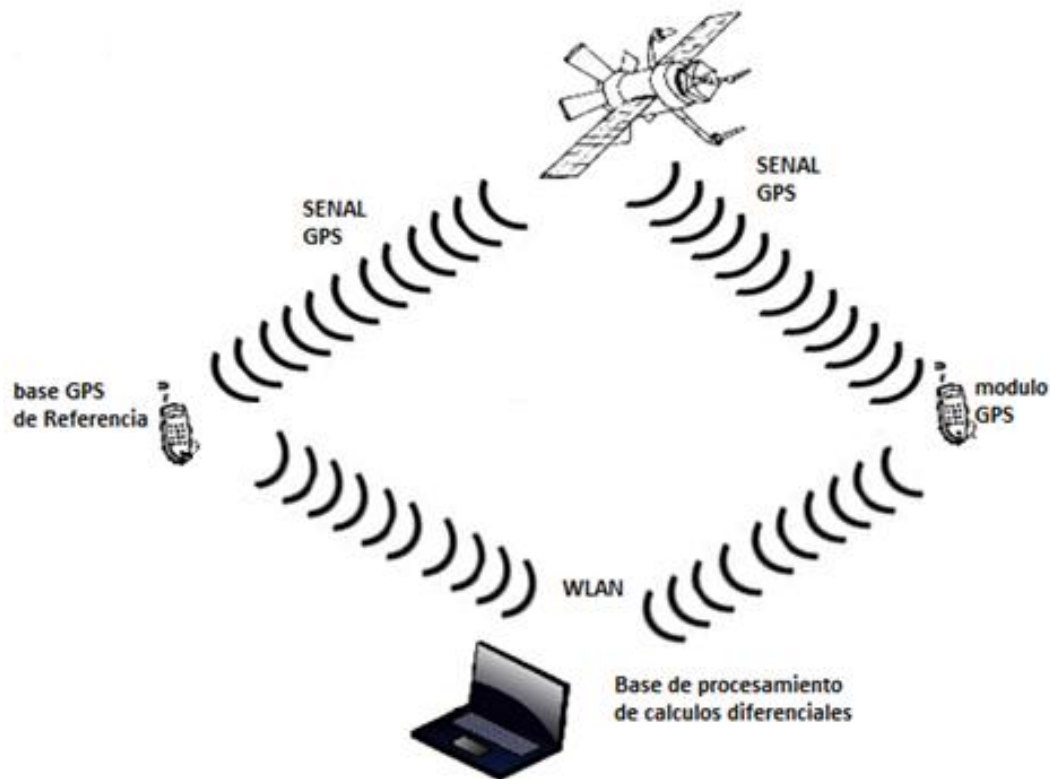


Figura 1: Diseño de funcionamiento planteado para el sistema propuesto.

Fuente: elaboración propia

I.2 Objetivos

A continuación se presentan los objetivos de este Trabajo Especial de Grado.

I.2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de posicionamiento global (G.P.S.) basado en terminales móviles, utilizando técnicas de corrección diferencial (D.G.P.S.), que permita obtener datos de ubicación con una mayor precisión a la del receptor G.P.S. comercial.

I.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar datos del funcionamiento del equipo G.P.S. y clasificarlos por su ubicación, hora del día, clima en el momento de la toma de datos, y otras situaciones que pueden afectar el trabajo del equipo.
- Estudiar los datos recopilados para así producir resultados estadísticos de las óptimas y pésimas situaciones, y llegar a conclusiones sobre las posibles causas de fallas del mismo para su posterior corrección.
- Construir un sistema que permita la comunicación y sincronización de los equipos involucrados tanto en la obtención de los datos de ubicación como en el procesamiento y la corrección de los errores presentes.
- Construir un sistema que permita corregir los errores estudiados a partir de los datos recopilados, basándose en el método de corrección diferencial de errores, y de ser posible, conseguir soluciones adicionales que permitan disminuir aun más el margen de error presente.

I.3 Alcances y limitaciones

- El alcance del proyecto fue el de construir un sistema D.G.P.S., partiendo de dos módulos G.P.S. comerciales instalados de fábrica sobre terminales móviles.
- El proyecto incluye todas las etapas de la construcción desde el diseño del sistema hasta la implementación y las pruebas de campo para probar la eficacia del mismo.
- El proyecto incluye el diseño de una interfaz gráfica sobre un ordenador ubicado en el terminal de referencia, que permite al usuario hacer un seguimiento de los dispositivos móviles, así como almacenar los resultados obtenidos entre la posición real y la posición establecida por los valores de las señales satelitales.
- El proyecto no está basado en ningún momento en medir velocidades de viaje a través de los dispositivos G.P.S. ni mejorar la precisión de esta funcionalidad del Sistema de Posicionamiento Global; su centro está en mejorar la precisión de las coordenadas de posicionamiento.
- El sistema construido está basado principalmente en los estudios sobre la corrección diferencial de errores que se deben a las distintas faltas, las cuales pueden ser provocadas por los satélites. Este a su vez intenta estudiar los errores producidos por los equipos durante la obtención de los datos satelitales y los cálculos necesarios para conseguir la ubicación actual, de manera de poder disminuir aun más el margen de error.
- El proyecto no tiene como objetivo principal la construcción de un método de corrección de errores de G.P.S. distinto a la corrección diferencial. De igual manera, durante el desarrollo del proyecto se hace un estudio de los errores que produce el equipo, y que son ajenos a los errores que se pueden corregir con cálculos diferenciales, y asimismo, se intentan definir condiciones para que el sistema que no se vea afectado por estos errores.

I.4 Justificación

El sistema de posicionamiento global G.P.S. es una tecnología que fue desarrollada en los años 70, y que para la época, fue extremadamente innovadora e útil, pero que con el pasar de los años y los avances tecnológicos que se han suscitado, la precisión de este se ha vuelto su punto menos fuerte.

Por otra parte, cada día son más las aplicaciones que se basan en el Sistema de Posicionamiento Global, y el intercambio de datos de ubicación se hace cada vez más comunes.

A partir de lo expresado anteriormente, se puede establecer que los avances que se han realizado en general sobre el sistema G.P.S., y otros sistemas de posicionamiento global, se han ido enfocando en las aplicaciones que pueden dársele a los mismos, siempre dejando de lado, las posibles mejoras que pueden realizarse sobre la precisión que este puede llegar a tener.

Por este motivo, se planteó como objetivo de este Trabajo Especial de Grado, el desarrollo de un sistema que aplicado al G.P.S., y basado sobre la teoría de correcciones diferenciales, pueda aumentar la precisión del sistema de posicionamiento antes mencionado.

Capítulo II

Marco Referencial

II.1 Global Positioning System G.P.S.

Conocido por sus siglas en español como Sistema de Posicionamiento Global, es, como su nombre lo indica, un sistema de ubicación geográfica basado en tecnología satelital. La técnica fundamental del G.P.S. es la medición de las distancias entre el receptor y algunos satélites que tengan visión directa a éste. Las posiciones de los satélites son transmitidas junto con la señal G.P.S. al usuario. A través de unas posiciones conocidas (de los satélites) y medidas entre el satélite y el receptor, la posición del receptor puede ser determinada. El cambio de posición, el cual también puede ser determinado, se traduce en la velocidad instantánea a la que está viajando el receptor. (Xu, 2007)

El Sistema de Posicionamiento Global fue diseñado y construido, y ahora operado y mantenido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos USDOD. El primer satélite G.P.S., fue lanzado en 1978, y el sistema comenzó a ser totalmente funcional a mediados de los años 90. La constelación G.P.S., consiste en 24 satélites en seis planos orbitales, con cuatro satélites en cada uno de esos planos. Los nodos ascendentes de los planos orbitales, están espaciados equitativamente 60 grados. Los planos orbitales se encuentran inclinados 55° cada uno. Cada satélite G.P.S., se encuentra en una órbita casi circular, con un eje mayor de 26.578 kilómetros y un periodo de aproximadamente doce horas. Los satélites se auto-orientan constantemente para asegurarse que sus paneles solares siempre apunten al sol, y sus antenas siempre apunten a la tierra. Cada satélite está equipado con cuatro relojes atómicos, son del tamaño de un automóvil, y pesan aproximadamente 1000 kilogramos. (Xu, 2007)

Los satélites G.P.S. son monitoreados por cinco estaciones base. La estación principal está ubicada en Colorado Springs, Colorado; las otras cuatro estaciones están ubicadas en Ascension Island (Océano Atlántico), Diego García (Océano Indico), Kwajalein y Hawái (Estas dos últimas en el Océano Pacífico). Todas las estaciones están equipadas con relojes de cesio de alta precisión y receptores que dictaminan las efemérides de transmisión y modelan los relojes de los satélites. A los satélites se transmiten los ajustes para los relojes y las efemérides de transmisión. Los satélites de turno utilizan estos datos de actualización en las señales que envían luego a los receptores de G.P.S. (Xu, 2007)

Cada satélite G.P.S. transmite data en tres bandas de frecuencia distintas: L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz), y L5 (1176,45 MHz). Las frecuencias portadoras de L1, L2 y L5 son generadas multiplicando las frecuencias fundamentales por 154, 120 y 115 respectivamente. Los códigos de ruido pseudoaleatorio (PRN), en conjunto con las efemérides de los satélites, el modelo ionosférico, y las correcciones de los relojes de los satélites, se superponen sobre las frecuencias portadoras L1, L2 y L5. Las mediciones de los tiempos de transmisión de las señales que viajan desde los satélites hasta los receptores se utilizan para computar los pseudorangos. El código (C/A) o código de Adquisición de Curso, también llamado Servicio de Posición Estándar (SPS), es un ruido pseudoaleatorio que se modula sobre la portadora L1. El código de precisión (P), también llamado Servicio de Posición Precisa (PPS), se modula sobre las portadoras L1, L2 y L5, para protegerlo de los efectos de remoción que ejerce la ionosfera sobre las señales. (Xu, 2007) Esta manera de funcionamiento de la señal que los satélites transmiten, es una forma de CDMA, *Code Division Multiple Access*, conocida en español como Acceso Múltiple por División de Códigos. (Hennerström, 2005)

Es bien sabido que los satélites del sistema G.P.S. funcionan únicamente en modo de *Broadcasting*, es decir, transmiten su señal sin un destino fijo ni específico, a cualquiera que le importe su información. Para que un receptor sea capaz de conocer su posición geográfica, se lleva a cabo una simple triangulación. Es una

solución de ubicación, basada en la intercepción de lugares geométricos. Midiendo la distancia que hay desde el lugar desconocido a un punto conocido, se sabe que la ubicación exacta se encuentra en algún lugar del radio que circunda a ese punto conocido. Conociendo la distancia a un segundo punto, la ubicación exacta se limita a los puntos de coincidencia de estos dos radios. Sabiendo la distancia a un tercer punto, se puede conocer cuál de los dos posibles lugares es el verdadero. (Hennerström, 2005)

II.2 Arquitectura del sistema G.P.S.

El sistema G.P.S., que sigue siendo controlado y mantenido por el Departamento de Defensa de Estados Unidos de América, posee una arquitectura de funcionamiento bastante simple, la cual consta de tres partes, la primera, el módulo de control, se encarga de hacer el mantenimiento de las estaciones espaciales de transmisión, actualización, y algunas otras cosas. El segundo, es el módulo espacial, que está conformado por 24 satélites, y el tercero, es el módulo usuario. (Hennerström, 2005)

II.2.1 Módulo de control

El módulo o segmento de control, se puso en funcionamiento en el año 1985. Éste consistía hasta el año de 2005, en cinco estaciones de monitoreo, agregándose luego una estación adicional, ubicadas todas en distintos puntos geográficos de manera estratégica, cuatro antenas para la transmisión de los datos desde las estaciones de control a las estaciones espaciales, y una estación principal de control llamada MCS (*Master Control Station*). A través de la incorporación de estaciones NGA, el número de estaciones de monitoreo fue extendido a 12, con una proyección a futuro de 17 estaciones. Asimismo, una segunda estación principal de control MCS está siendo agregada al sistema como alternativa a la principal, esta estará ubicada en el estado de California. (Groves, 2008)

El módulo de control del sistema G.P.S., tiene unos objetivos fundamentales bien definidos, los cuales son:

- Velar por el mantenimiento del reloj del sistema G.P.S.
- Velar por la condición y el funcionamiento de los satélites G.P.S.
- Monitorear y predecir la ubicación orbital de cada uno de los satélites G.P.S.
- Controlar y estudiar las maniobras realizadas por los satélites G.P.S., para mantenerse en órbita, y mantener la coordinación entre las posiciones de cada uno de ellos.
- Hacer revisión del desempeño del reloj del sistema G.P.S.
- Controlar y actualizar los mensajes NAV.

El funcionamiento de éste módulo del sistema, se realiza a través de las estaciones de control en tierra ubicadas en distintos puntos alrededor del globo terráqueo, la estación central de control, es capaz de recibir la información de *Broadcast* transmitida por cada uno de los 24 satélites. (FRED, 2002) A través del estudio de esta información, la MCS puede hacer seguimiento de cada uno de los relojes de los satélites, procesándola en conjunto mediante la implementación de Filtros de Kalman, para luego enviar la información de corrección a las tres antenas de transmisión, que posteriormente, la enviarán a cada uno de los satélites. Estas comunicaciones entre las antenas y los satélites, se hacen durante todo el día, ya que dependiendo de la ubicación de cada uno de ellos, podrá una u otra antena hacer la comunicación directa con estos. (Hennerström, 2005)

II.2.2 Módulo espacial

El módulo espacial, o segmento espacial de la arquitectura G.P.S., está conformado por los 24 satélites que trabajan en el mismo. Se puede decir, que entre las tres partes que conforman el sistema, ésta es la más importante, ya que es la que se encarga de la transmisión de la información constantemente, a comparación con el

segmento de control, que hace una actualización diaria promedio por cada satélite, y la base usuario, que de lo único que se encarga, es de traducir los mensajes de los satélites en información útil para el usuario. (Hennerström, 2005)

Hay que destacar, que el sistema G.P.S. si bien actualmente está operando con 24 satélites ubicados con separaciones constantes y bien definidas entre ellos, alrededor de órbitas diferentes, es un sistema que podría funcionar hasta con 36 satélites, ya que teóricamente, la distribución espacial que estos tienen, les permitiría esa cantidad de estaciones espaciales en funcionamiento. En el espacio, existen muchos más satélites G.P.S., como se ha dicho, pero algunos ya dejaron de funcionar, específicamente los primeros que se lanzaron cuando el proyecto comenzó a funcionar, y existen otros, que están mantenidos en órbita pero en *Standby*, o en estado de reposo, esperando a que los satélites más longevos empiecen a fallar. (Groves, 2008)

En cuanto a la evolución que ha tenido el segmento espacial del sistema G.P.S., se puede decir que han existido siete bloques de estaciones espaciales G.P.S. que han sido puestos en órbita, cada uno de éstos bloques ha sido una evolución del anterior, y han contado con un número de satélites diferentes. (Groves, 2008)

Los satélites G.P.S. que están actualmente en funcionamiento, entre los bloques II y IIF, orbitan radialmente a una lejanía de 26.600 km del centro de la Tierra aproximadamente. Éstos se encuentran distribuidos en seis planos orbitales diferentes, cada uno de ellos a una inclinación de 55° con respecto a la línea del ecuador, y una separación de 60° entre ellos. En cada uno de los planos orbitales, los satélites que lo ocupan, tienen una separación dispareja entre ellos. Dos de éstos (cada plano orbital contiene al menos cuatro satélites), tienen una separación de aproximadamente 30° , mientras que los demás están espaciados entre 92° y 137° . Hay que destacar que la primera generación de satélites, tenía una distribución diferente, mientras que la próxima a ser lanzada (Bloque III) aun no ha sido especificada. (Hennerström, 2005)

II.2.3 Módulo usuario

El módulo usuario o segmento usuario, es el más variado de todos. Existen varios tipos de módulos que funcionan perfectamente en el sistema G.P.S. Además de los gigantes cambios que ha tenido la electrónica desde que se estableció el sistema G.P.S., hasta estos días. Los grandes cambios en las dimensiones, la velocidad de procesamiento de los sistemas, la evolución de la multimedia, y muchas otras cosas, han hecho que el sistema G.P.S., se haya convertido no solamente en un equipo personal, por sus dimensiones, sino totalmente válido para cualquier persona, ya que actualmente existen equipos usuarios que se producen en grandes masas, y a costos muy bajos. (Hennerström, 2005)

Todos estos desarrollos, en un principio fueron los que hicieron posible que se abriera el sistema de ubicación satelital para civiles, y no sólo para uso militar, como se suponía sería en un principio. (FRED, 2002)

También se debe mencionar, que gracias a todos los avances que se han hecho, los equipos G.P.S. de usuario permiten obtener información con mayor precisión. (FRED, 2002)

Estos nuevos desarrollos tecnológicos proporcionan funcionalidades como establecer una memoria de los lugares que se han visitado con el terminal, aumentar la sensibilidad de la antena receptora, implementar sistemas de corrección de errores a través de la sincronización como otros sistemas de asistencia de ubicación, y muchas otras soluciones, que han ido estableciéndose con el tiempo y que poco a poco han ido aumentando la precisión del equipo. (FRED, 2002)

Hay que destacar, que aunque la apertura al uso del sistema G.P.S. por civiles no se hizo sino hasta el año de 1995, ya en 1980 existían equipos civiles que utilizaban esta señal. (Warren, 2002)

Entrando en la parte técnica del segmento usuario, estos se pueden clasificar según la señal que son capaces de decodificar, en segmento usuario comercial, y segmento usuario militar. El segmento comercial, o civil, recibe la señal SPS, mientras que la señal PPS sólo puede ser entendida por equipos autorizados por el DOD. (Hennerström, 2005)

II.3 Señal GPS

La señal que contiene los datos G.P.S., permite que los datos de ubicación de los satélites y demás información contenida en las transmisiones, lleguen a tierra, y sea transmitida en modo *Broadcast* por los satélites, permitiendo que cualquier equipo que pueda entender la señal, sea de esa misma manera, capaz de utilizarla. (FRED, 2002)

Hay que indicar que a lo largo de este proyecto, todas las implementaciones, cálculos y demás trabajos, serán realizados sobre el aprovechamiento de la señal de posicionamiento estándar SPS. La otra señal PPS, permitida únicamente para usos autorizados por el USDOD como antes se menciona, tiene un margen de error mínimo, ya que utiliza señales mucho más complejas, que contienen información adicional, que permite que la precisión sea casi del 100%. Por no ser el servicio PPS trabajado en ningún punto de este proyecto, no se analizará su composición ni sus características, serán mencionadas. (Solares, 2002)

II.3.1 Transmisión de la señal SPS

Para permitir que todos éstos satélites puedan transmitir simultáneamente, sabiendo de antemano, que más de un satélite llegará al mismo espacio en el mismo instante de tiempo, utilizando la misma frecuencia, la transmisión de todas estas señales se hace implementando la técnica CDMA. (Groves, 2008)

La estructura de esas transmisiones, está definida por dos señales de navegación, que son transmitidas en canales diferentes en la banda L, entre 1 y 2 GHz de frecuencia cada uno. La frecuencia central de cada uno de esos canales, fue establecida basándose en los estándares de las frecuencias atómicas, ya que es de ésta manera que se generan las portadoras. La frecuencia fundamental de ambas señales, es un poco menor a los 10.23 MHz, mientras que las señales portadoras, se obtienen a través de la multiplicación de ésta por escalares definidos para cada uno de los canales. (Hennerström, 2005)

$$FL1 = 2 \times 77 \times 10.23 \text{ MHz} = 1575.42 \text{ MHz. (Hennerström, 2005)}$$

$$FL2 = 2 \times 60 \times 10.23 \text{ MHz} = 1227.60 \text{ MHz. (Hennerström, 2005)}$$

La señal moduladora L1 de cada uno de los satélites del sistema, es modulada utilizando BPSK *Binary Phase Shift Keying* o como se conoce en español, Modulación Binaria por Desplazamiento de Fase. Posteriormente, a ésta señal contenida en el canal L1 se le aplican dos códigos pseudoaleatorios en cuadratura en fase, los cuales se conocen como el código C/A, y el código P. (Groves, 2008)

La señal moduladora L2 por otra parte, es procesada y preparada para su transmisión de la misma manera que la L1, pero con la diferencia que ésta se codifica implementando únicamente el código P. (Groves, 2008)

La codificación de estas señales L1 y L2 es bastante compleja. Es este factor el que permite que todos los satélites puedan transmitir su señal en una misma frecuencia, y que éstas no se interfieran ni se cancelen unas con otras. (Groves, 2008)

La Multiplexación por División de Códigos que utiliza el sistema G.P.S. en sus transmisiones, permite que varias señales puedan ser transmitidas utilizando la misma frecuencia portadora, y que puedan sobrevivir en el mismo espacio y al mismo tiempo. Cada módulo satelital posee unos códigos pseudoaleatorios PRN diferentes, los cuales son aplicados a estas señales antes de ser transmitidas. Todos los códigos

PRN, se encuentran almacenados en los módulos usuario, o bien, éstos son capaces de generarlos. (Groves, 2008)

El código P o código de precisión, es el principal de éstos dos códigos, ya que es el que está contenido en las dos señales de navegación. Tiene una frecuencia de trabajo, o *chip rate* de 10 veces la frecuencia primaria, $10 \cdot f_0 = 10.23 \text{ MHz}$. De esta manera, se dice que la frecuencia fundamental es 10.23 MHz y no 1.023 MHz, ya que, cómo se estableció anteriormente, el código P es común para ambos canales, y por tanto su *chip rate* se toma como frecuencia fundamental. Asimismo hay que destacar sobre éste código, su robustez, así como su gran longitud. (Groves, 2008)

El otro código, conocido como C/A, o *Coarse Acquisition Code* tiene la función de facilitar la obtención de la señal por parte del módulo usuario, y dar paso a la traducción del código P para obtener la información pura. Por ésta razón, este código es bastante corto y básico, y utiliza como frecuencia de trabajo la $f_0 = 1.023 \text{ MHz}$. (Groves, 2008)

El código C/A se repite cada 1023 iteraciones, mientras que el código P completo pasa 259 días hasta que se pueda repetir, permitiendo así que cada satélite pueda transmitir una sección diferente del código en cada momento. Estas secciones en las que está dividido el código P, son únicas para cada satélite, y tienen una duración de siete días exactos cada una. (Groves, 2008)

II.3.2 Contenido de la señal

Para empezar a analizar el contenido de la señal, hay que entender que el objetivo del sistema, es calcular la posición instantánea del receptor a través de cálculos a partir de datos, como la posición de los satélites en ese instante, la distancia entre éstos y el receptor, el tiempo de propagación de las ondas transmitidas, y otros factores involucrados. Pero además de estos datos, es deber de cada satélite, informar a los receptores el momento en que este sistema se encuentre transmitiendo datos erróneos, ya que el usuario podría descartar algunos datos de sus cálculos.

Un mensaje de navegación que contiene todos estos datos, es transmitido por cada satélite. Éste tiene una frecuencia de 50 Hz, y viene entretejido en los códigos P y C/A. El mensaje de navegación, contiene datos tanto propios de ese satélite como generales de otros, para de igual manera, comunicar el malfuncionamiento de cualquier otro módulo espacial. También puede el receptor deducir errores, ya que el mensaje de navegación contiene datos que deben coincidir en los mensajes de navegación de todos los satélites. (Solares, 2002)

II.4 Errores del sistema GPS

II.4.1 Error del reloj del satélite

Este tipo de error, como su nombre lo indica, representa la discordancia que puede presentar el reloj atómico del satélite, respecto al tiempo G.P.S. Los satélites llevan relojes atómicos con osciladores de Cesio, sin embargo, ni siquiera esto garantiza un perfecto funcionamiento. (Automata., 1999)

Una de las funciones principales de las estaciones de seguimiento con base en tierra que forman parte del sistema G.P.S., es la de recibir el mensaje que envía constantemente el satélite, el cual contiene unos datos del reloj de éste, como lo son los coeficientes de marcha del reloj inicial, y el desfase medido para un tiempo inicial.

A partir de estos parámetros, una estación de seguimiento puede determinar que el oscilador del satélite presenta un error, y enviar un mensaje al satélite con una actualización de los datos. Sin embargo, todas estas correcciones realizadas gracias a la coordinación entre los satélites y las bases en tierra, no son suficientes para corregir los errores de reloj que pueden presentar los “*broadcasts*” de los satélites. Siempre existirá un error residual que se estima que sea de unos diez nanosegundos. (Automata., 1999)

II.4.2 Errores en los parámetros orbitales

Son errores que afectan la determinación de la posición del satélite en un instante dado con respecto a un sistema de referencia determinado. Estos errores son originados ya que no se conocen con la exactitud necesaria las posiciones de los satélites en las órbitas. Esto ocurre, debido a la gran distancia a la que se encuentra el satélite, haciendo que resulte muy complicado conocer con tanta exactitud el punto en el que se encuentra ubicado en un momento dado. Este tipo de error también se suele llamar error de efemérides. (Automata., 1999)

II.4.3 Errores relativos a la propagación de la señal

El método que utiliza el terminal de usuario G.P.S., para calcular la distancia que recorrió la señal para llegar a éste, es el cálculo de la distancia utilizando las variables velocidad y tiempo. La hora del reloj satelital a la cual fue enviado el mensaje (la cual está contenida en el mismo) y la hora a la cual el receptor acogió el mensaje, conforman la variable distancia, mientras que la velocidad de propagación de la señal es conocida. La multiplicación del intervalo de tiempo por la celeridad de la onda arroja como resultado la distancia.

Esta condición hace que el factor velocidad tenga un grado alto de importancia en los cálculos. En condiciones perfectas, la velocidad de propagación de la onda es igual a la velocidad de la luz, sin importar la frecuencia de esta, pero debido a la cantidad de medios que tiene que pasar la misma hasta alcanzar el receptor, condiciona este factor en el sistema G.P.S., y le baja con creces el grado de exactitud de estos cálculos, generando un error. (Automata., 1999)

II.4.4 Pérdida de ciclos

La pérdida de ciclos, no es más que el error que se puede generar si el receptor pierde algún ciclo, o algún segmento de la señal. El error se genera luego de esta pérdida, ya que ésta generará un tiempo de retraso, que será el que va a tomar el

receptor en adaptarse en fase a la onda que contiene los datos transmitidos por el satélite. Además de este retraso, la importancia de la pérdida de ciclos radica en que el software que desmodula los datos y hace los cálculos, se dé cuenta que hubo un pequeño salto en la información, y ver si a través de alguno de los métodos existentes, puede entender el mensaje completo. Estas pérdidas de ciclos, pueden tener como causa, la obstrucción de la onda portadora transmitida por el satélite, debido a la presencia de árboles, edificios, puentes, montañas, etc. Estas pérdidas de ciclos ocurren con baja frecuencia, pero debido al receptor de G.P.S. se va a encontrar en constante movimiento, siempre existe la posibilidad de que en un momento dado, éste pase por un túnel, muy pegado a un edificio, o por algún lugar que impida que en ese momento la señal sea transmitida con éxito al receptor. (Automata., 1999)

II.4.5 Efecto multiruta

El Efecto Multiruta, o *Multipath Effect*, es una condición que afecta cualquier tipo de transmisión de señales a través del aire. Éste se origina, debido a la posibilidad de que una señal reflejada por objetos ubicados en la superficie de la tierra llegue al receptor por dos o más trayectorias. Se trata de que no solo la señal que va directamente del transmisor al receptor, sea la que éste reciba, sino también señales que tienen una dirección diferente, pero que impactan contra alguna superficie que las refleja, cambiándoles la dirección, y llegando a través de otro camino, al receptor. Estas señales, que se superponen a la señal directa de los satélites, son siempre más largas, ya que tienen un tiempo de propagación más largo, y pueden deteriorar significativamente la amplitud y forma de la onda original. (Automata., 1999)

II.5 Differential G.P.S.

El sistema G.P.S. diferencial, también conocido como D.G.P.S. por sus siglas en inglés, es una técnica de perfeccionamiento del sistema de posicionamiento global

(G.P.S.) aplicada para su versión civil. Éste utiliza una red de estaciones fijas (compuesta por uno o más receptores de G.P.S.), de referencia en tierra, para transmitir la diferencia entre las posiciones indicadas por los sistemas de satélite y la posición fija conocida. Este sistema diferencial se basa en la teoría que plantea que si dos receptores G.P.S. se encuentran a una corta distancia uno del otro, el error que presentará uno, será con una muy alta probabilidad, igual al error que presentará el otro. Partiendo de esto, si se utiliza uno de los receptores como receptor fijo, en una posición conocida con exactitud a través de algún otro sistema de ubicación, el otro receptor podrá conocer con detalle toda la información acerca del error que está recibiendo de las señales de los satélites. (Correia, 2000)

Los errores causados por los relojes de los satélites se pueden eliminar utilizando la información de la estación de referencia siempre y cuando ésta, y el receptor en cuestión, estén trabajando con la información de los mismos satélites. Los errores en los parámetros orbitales, bajo estas condiciones, también se compensan. (Ordóñez & Kayser, 1994)

Mientras más cercana se encuentre la estación de referencia al receptor, mayor será la mejora en la precisión. Mientras más lejos se encuentre el usuario de la estación de referencia, más se irá degradando el error, ya que la señal G.P.S. que reciba el receptor, y la que reciba la base de referencia, tendrán tiempos diferentes debido a los diferentes obstáculos que tendrá que atravesar para llegar a un receptor y al otro. (Ordóñez & Kayser, 1994)

Por otro lado, si el usuario se encuentra muy alejado de la base de referencia, no se garantiza que la información que reciben los dos provenga de los mismos satélites, causando que la información de ajuste de error que reciba el usuario no derive del error que tiene su información inicial. (Ordóñez & Kayser, 1994)

El funcionamiento del sistema D.G.P.S. también apoya parte de su buen funcionamiento en la comunicación que exista entre el receptor G.P.S. del usuario, y

el receptor G.P.S. de la base de referencia. Usualmente esta comunicación es por radio. (Ordóñez & Kayser, 1994)

Debido a que la actualización de la información dada por el receptor ocurre con una frecuencia bastante alta, y que los satélites se encuentran en constante transmisión de sus datos, los errores van variando rápidamente, así que las comunicaciones entre la base de referencia y el receptor del usuario tienen que darse con una periodicidad bastante corta. El error que se produce por la tardanza de las correcciones, se conoce como efecto de latencia. Estos son el resultado de ajustar el error dado por un paquete de datos recibido de los satélites, utilizando como referencia el error de paquetes de datos anteriores. A través de pruebas experimentales, se ha demostrado transmitir correcciones cada cinco segundos garantiza una buena mejora de la precisión en la ubicación. (Ordóñez & Kayser, 1994)

Aparte de informar a los usuarios del error que están recibiendo en la información de los satélites, las estaciones de referencia D.G.P.S. pueden también, paralelamente, llevar un control del estado de las señales transmitidas por los satélites. Este control tiene igual o más importancia que la información de la mejora en la precisión, ya que, debido a la estructura y el funcionamiento del Segmento de Control del G.P.S., un satélite puede transmitir señales erróneas durante varias horas antes de ser detectada esa deficiencia. No obstante, una base de referencia D.G.P.S., a través de los mensajes que transmite a los usuarios, los podría mantener informados, de los satélites que estén fallando en cada momento; de esta manera, los usuarios podrían, a través de opciones que brindan los receptores de G.P.S., descartar los datos de alguno de los satélites para los cálculos de posición y velocidad. (Ordóñez & Kayser, 1994)

II.5.1 Errores involucrados en corrección D.G.P.S.

Hay que destacar, que no todas las fuentes de error involucradas en el sistema G.P.S. pueden ser corregidas aplicando la técnica diferencial de corrección. Esto se debe a que no todos los errores son propios de la transmisión, y no todos los errores son comunes entre receptores. Existen varios tipos de error que pueden ser propios del módulo usuario, y que la base de referencia no podría corregir. (Hennerström, 2005)

Entre los errores más comunes, propios de cada módulo receptor se pueden encontrar el ruido presente en sus componentes eléctricos, las interferencias que puede presentar este por equipos, dispositivos, edificaciones, o cualquier otro objeto que pueda ser causante de interferencias propias de ese módulo, es decir, estos elementos tienen que estar a una distancia corta del receptor usuario. Errores en el reloj del módulo receptor y los causados por el Efecto Multiruta tampoco pueden ser corregidos por una base diferencial G.P.S. (Hennerström, 2005)

Las razones por las cuales estos errores no pueden ser corregidos son bastante sencillas. Analizando el funcionamiento de la técnica de corrección G.P.S., es posible darse cuenta que su objetivo fundamental es corregir los errores que pueden presentarse en los distintos receptores G.P.S. que estén funcionando en un área común, y que estén presentes en todos ellos, cualquier error que no cumpla con esta definición, no podrá ser corregido.

II.5.2 Tipos de Implementaciones de D.G.P.S.

Existen dos formas de implementar mediciones diferenciales. Una se basa en las mediciones de rango del código (*Ranging-code measurements*) y la otra en las mediciones de fase de la portadora (*Carrier phase measurements*). (Palmerini & Sabatini, 2008)

II.5.2.i Ranging-Code D.G.P.S.

Utiliza las mediciones de pseudorango o de posición incluidas en el código G.P.S. En el primer caso, la estación de referencia (ER) en tierra subtrae la distancia real entre ella y cada uno de los satélites involucrados (previamente calculada), al pseudorango estipulado en la trama G.P.S. La ER luego envía esta corrección calculada al receptor usuario (RU) quien discierne la corrección apropiada para cada uno de los satélites y se la resta al pseudorango medido. El RU sólo debe utilizar satélites de los cuales recibe correcciones. (Palmerini & Sabatini, 2008)

Es posible también hacer las correcciones mediante las medidas de posición, en cuyo caso la ER subtrae la posición medida a su posición real. Mediante este método se disminuye la complejidad de los cálculos con la desventaja que hay que coordinar tanto la ER como el RU para que utilicen los mismos satélites, o que la ER realice cálculos de posición para todos los arreglos de satélites posibles. Por esta razón resulta más eficiente hacer las correcciones a través del pseudorango. (Palmerini & Sabatini, 2008)

Las mediciones, ya sean de pseudorango o de posición, están etiquetadas temporalmente. Esto se debe a que a medida que transcurre el tiempo disminuye la validez de las correcciones y en esos casos resulta más preciso utilizar la medición G.P.S. En aplicaciones de tiempo real se mide la tasa de cambio de las correcciones de modo de poder propagarlas en el momento en que deben ser aplicadas en el usuario. (Palmerini & Sabatini, 2008)

Hay dos tipos de mediciones D.G.P.S.; las que se realizan post-misión y aquellas realizadas en tiempo real. La primera tiene mayor precisión dado que se pueden filtrar ciertos errores al analizar la solución, pero tiene la desventaja que no tiene uso alguno para efectos de navegación. (Palmerini & Sabatini, 2008)

II.5.2.ii Diferencia Sencilla Entre Receptores

En la figura mostrada a continuación, se observan las posibles mediciones de pseudorango entre dos receptores (k, l) y dos satélites (p, q). Si los pseudorangos 1 y 2 son diferenciados, luego el error del reloj del satélite y el error de la órbita del satélite serán removidos. (Palmerini & Sabatini, 2008)

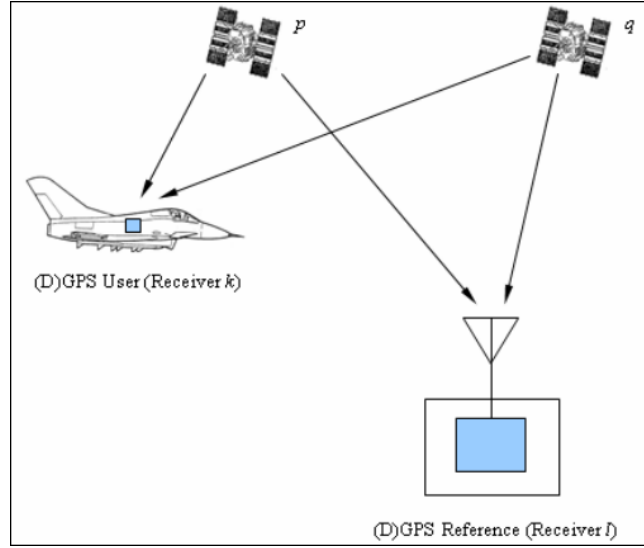


Figura 2: Diferencia entre receptores.

Extraído de (Palmerini & Sabatini, 2008)

El modelo matemático básico para la observación del pseudorango por diferencia sencilla es el siguiente:

$$P_k^p - P_l^p = \rho_k^p - \rho_l^p - (dt_k - dt_l)c + d_{k,p} - d_{l,p} + d_{k,p}^p - d_{l,p}^p + \Delta\epsilon_p$$

Figura 3: Ecuación de Diferencia Sencilla Observable.

Extraído de: (Palmerini & Sabatini, 2008)

(Palmerini & Sabatini, 2008) describe la ecuación de la siguiente manera “... donde P_i^p es la medición del pseudorango, ρ_i^p denota la distancia geométrica entre las estaciones y el satélite, dt_i denota el offset del reloj del receptor, $d_{i,p}$ denota el retardo del código de hardware del receptor, $d_{i,p}^p$ denota el *Multipath* de los

códigos, $\Delta \epsilon_p$ denota la medición de ruido y c es la velocidad de la luz. La ecuación completa representa el pseudorange por diferencia sencilla observable entre receptores. Otro tipo de diferencia sencilla aparte de éste, es conocido como diferencia sencilla entre satélites”.

Como se puede observar, la ecuación anterior consta de cuatro incógnitas. Por lo tanto se requiere de un mínimo de cuatro satélites, dado que cada uno aporta una variable distinta para poder resolver el sistema de ecuaciones que se genera. El modelo de diferencia sencilla es frecuentemente usado en la navegación diferencial. (Palmerini & Sabatini, 2008)

II.5.2.iii Doble Diferencia Observable

Sobre la Doble Diferencia Observable, (Palmerini & Sabatini, 2008) establece lo siguiente: “Utilizando todos los pseudoranges mostrados en la Figura 2, las diferencia son formadas entre receptores y satélites. Diferencias dobles son construidas tomando dos diferencias sencillas entre receptores y diferenciándolas entre dos satélites. Este procedimiento remueve todos los errores dependientes de los satélites, receptores y la mayoría de los errores atmosféricos (si la distancia entre dos receptores no es muy grande).” La ecuación derivada es:

$$P_k^p - P_k^q - P_l^p - P_l^q = \rho_k^p - \rho_k^q - \rho_l^p - \rho_l^q + d_{i,p}^j$$

Figura 4: Ecuación de Doble Diferencia Observable.

Extraído de: (Palmerini & Sabatini, 2008)

Donde $d_{i,p}^j$ denota el efecto total de *Multipath* o multiruta.

En la ecuación de la figura 4 podemos encontrar tres incógnitas; las coordenadas de la estación l. Cuatro satélites es el número mínimo requerido, ya que con estos se pueden formar tres ecuaciones de doble diferencia de modo de hallar el valor las incógnitas.

Utilizando la ley de propagación de errores, se muestra que las ecuaciones de doble diferencia observable contienen dos veces más ruido que el pseudorange puro.

$$\sigma_{DD} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_p^2 + \sigma_p^2 + \sigma_p^2} = 2\sigma_p$$

Figura 5: Ecuación de Ley de propagación de errores.

Extraído de: (Palmerini & Sabatini, 2008)

Asimismo, como (Palmerini & Sabatini, 2008) establecen este hecho, también versan lo siguiente: "... son más precisas, debido a que la mayoría de los errores son removidos. Nótese que el *Multipath* se mantiene porque no puede ser modelado y es independiente para cada receptor.

II.5.3 D.G.P.S. en tiempo real.

El sistema de corrección G.P.S. diferencial en tiempo real, es el que consta de una base de referencia que se encuentra en cada instante de tiempo enviando correcciones a los receptores de G.P.S., y que también está constituido por receptores, que aparte de recibir la señal de los satélites, y calcular su posición, velocidad, y dirección de viaje con el margen de error que estos le permiten, tiene la capacidad de recibir, desmodular, descifrar, e involucrar en sus cálculos, la información que aporta la base de referencia D.G.P.S. Como resultado de todo este sistema de funcionamiento, el receptor G.P.S. utilizado, arroja en cada momento resultados de posicionamiento diferencialmente corregidos, lo que significa que presentan una alta precisión. (Chivers)

II.5.4 Postprocesamiento de correcciones.

Este es otro método que difiere del D.G.P.S. en tiempo real. Es un método bastante más sencillo en cuanto a las comunicaciones entre la base de referencia y el receptor, ya que el procesamiento de los datos de corrección diferencial no tiene que ocurrir en el mismo momento. Este es un método bastante utilizado en tareas de

delimitación de terreno, de búsqueda y rastreo de minas, y muchas otras actividades de este tipo. (Correia, 2000)

Este método básicamente se basa en el mantenimiento ordenado de los cálculos tanto del receptor G.P.S. como de la base de referencia, para luego hacer los cálculos de las distintas posiciones de desplazamiento y las velocidades, utilizando la información de los dos receptores, el receptor referencia y el receptor del usuario.(Chivers)

La base teórica del funcionamiento de este método, es que tanto el receptor G.P.S. como la base de referencia, envían los datos de posicionamiento, y los datos de corrección diferencial, respectivamente, a un ordenador central, que mediante un software de corrección, hará todos los cálculos para obtener datos más exactos de las posiciones del receptor G.P.S. (Chivers)

II.5.5 Procesamiento de datos en tiempo real.

Este es un método que se puede decir, difiere de los métodos anteriores, pero a su vez es producto de la combinación de estos dos. Es un servicio de software para postprocesamiento que proporcionan algunos fabricantes de sistemas D.G.P.S. Este servicio de software se basa en el posterior estudio del procesamiento en tiempo real de los datos de corrección diferencial. Ya que en tiempo real, el procesador de poca capacidad de un receptor G.P.S., trabaja con los datos recibidos de ajuste diferencial, y los procesa sin darse cuenta que satélites han sido tomados. El reprocesamiento de datos en tiempo real simplemente analiza todos los datos, para descartar errores que existan si se ha tomado en cuenta algún satélite que se encontraba en mal funcionamiento, o con un grado de inclinación tan bajo que la señal pudo causar algún tipo de error en los cálculos.(Chivers)

II.6 Incremento en la precisión del sistema G.P.S. civil.

En una tesis de maestría titulada “*Increasing G.P.S. accuracy for low cost receivers*” desarrollada por David Hennerström en *Lulea University of Technology* en el año 2005, se puso en evidencia la complejidad del procesamiento de los datos arrojados por un sistema G.P.S. para la creación de un sistema diferencial que permitiese la corrección de errores. El objetivo principal de esta tesis era la creación de un sistema de G.P.S. diferencial de bajo coste que permitiera aumentar el nivel de precisión de un receptor G.P.S. comercial. Esta tesis no pudo ser concluida, ya que el tiempo propuesto por el realizador fue muy corto para lo planteado. (Hennerström, 2005)

Aunque los resultados no fueron los planteados en el objetivo del trabajo expuesto, el trabajo mencionado llegó a conclusiones importantes, y algunas bastante sólidas. Aumentar la precisión de un sistema G.P.S. sin hacer uso de técnicas que asistan al módulo usuario es una tarea casi imposible de realizar, concluyó este trabajo. Hipótesis como intentar mejorar la precisión a través de optimizar procesos como el filtrado de las señales recibidas por los módulos espaciales fueron descartadas si no se usaba la asistencia de otro sistema de ubicación, o bien de técnicas de corrección como la planteada en este trabajo. (Hennerström, 2005)

II.7 Sistemas de comunicación aplicados en D.G.P.S.

La RTCM (*Radio Technic Commission for Maritime Services*) una organización científica y educacional sin fines de lucro, definió y estableció estándares en los protocolos utilizados en los mensajes enviados desde las bases de referencia hasta los receptores G.P.S. (Chivers)

El comité encargado del área de los sistemas G.P.S. diferenciales fue creado en el año 1983, con el propósito de establecer estándares. Hoy en día, muchos de

estos estándares son utilizados, tanto para los paquetes de datos, como para los formatos de transmisión, y hasta para las estrategias de uso de los pseudosatélites. (Ordóñez & Kayser, 1994)

Entre los estándares establecidos, esta que el formato de los mensajes transmitidos de la base de referencia a los receptores G.P.S. es bastante similar al transmitido de los satélites a los receptores, pero con una diferencia fundamental en la variación del tamaño. Se trata de que la longitud de los mensajes D.G.P.S. puede cambiar dependiendo de la información que vaya a ser transmitida, los mensajes que se transmiten de los satélites siempre son iguales. (Ordóñez & Kayser, 1994)

II.8 Métodos de comunicación entre base de referencia y usuario.

Una parte muy importante a considerar durante el desarrollo de este proyecto, y en general de cualquier sistema de G.P.S. diferencial, es el papel trascendental que juega el sistema de comunicación entre el módulo G.P.S. diferencial de referencia y las distintas estaciones G.P.S. usuario que utilizan la corrección. (Palmerini & Sabatini, 2008)

Usualmente, considerando que los sistemas de D.G.P.S. son implementados para más de un módulo usuario, y que éstos no reciben información de los usuarios en ningún momento, su transmisión se lleva a cabo exactamente de la misma manera que las transmisiones de los satélites, utilizando la multidifusión. La principal condición técnica para que un sistema diferencial pueda funcionar, es que el módulo usuario tiene que estar apto para recibir no solamente los datos que envían los módulos espaciales, sino también aquellos que envía el segmento de referencia, es decir, tiene que tener habilitados al menos dos canales diferentes de transmisión. (Palmerini & Sabatini, 2008)

Por cuanto la razón fundamental que éste proyecto es parte de un prototipo de vehículo aéreo que se creó, en el cual se han ido implementando distintos sistemas progresivamente de manera investigativa, el alcance que se necesita que tenga el sistema referencial con respecto al sistema de usuario, es similar al de una red de área local, es decir, a lo sumo unos 200 metros si es posible. La razón de esto, es principalmente que a medida que un segmento usuario se va alejando de su corrector diferencial, el margen de error que se puede corregir va disminuyendo, y el principal objetivo de esta investigación es realizar un sistema que corrija los errores del Sistema de Posicionamiento Global, para luego estudiarlos, y compararlos con su desempeño en condiciones normales; y de realizarse un diseño de D.G.P.S. con largas distancias entre la base de referencia y el usuario, el error que se podría corregir podría llegar a ser casi imperceptible. (Palmerini & Sabatini, 2008)

II.9 Wi-Fi™ (*Wireless Fidelity*)

Nombre que recibe la familia de estándares 802.11 desarrollada por la IEEE, la cual especifica los lineamientos para la comunicación inalámbrica entre dos dispositivos. Ofrece un rango de hasta 100 m y su principal ventaja es la movilidad que ofrece a los usuarios al tiempo que se aumentan los problemas en cuanto a seguridad. (Labiod, Afifi, & De Santis, 2007)

Wi-Fi utiliza radio frecuencias (RF) en la Capa Física del modelo OSI para la transmisión de los datos en la banda de los 2,4 GHz y más recientemente en la banda de los 5 GHz. La primera brinda mayor rango, mientras que la segunda banda se incorporó para evitar interferencias de otros dispositivos. (Labiod, Afifi, & De Santis, 2007)

Se utilizan dos técnicas para la modulación de los bits de datos; *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) el cual proporciona velocidades altas de transmisión (54 Mbps) y *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) que permite

velocidades de transmisión menores (hasta 11 Mbps) pero a su vez es más simple que OFDM y por lo tanto su implementación resulta más económica. (Parziale, et al., 2006)

A diferencia del protocolo Ethernet donde antes de transmitir se siguen directrices de *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* (CSMA/CD), Wi-Fi utiliza como mecanismo de acceso al medio, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) que consiste en detectar la presencia de energía en el medio antes de transmitir de modo de evitar cualquier tipo de colisión. Esta diferencia se debe a la imposibilidad de implementar CSMA/CD en un ambiente inalámbrico. (Parziale, et al., 2006)

La seguridad, tanto para el estándar 802.11 como para muchos otros protocolos de comunicaciones inalámbricas, resulta una preocupación mayor. A causa de su naturaleza y su amplio rango Wi-Fi puede ser objeto de ataques o de accesos no autorizados a la red de no tomarse las medidas de seguridad apropiadas. (Labiod, Afifi, & De Santis, 2007)

II.10 Bluetooth™

Tecnología dedicada a las comunicaciones inalámbricas de corto alcance, desarrollada por la compañía sueca Ericsson y mantenida actualmente por el *Special Lobby Special Interest Group (SIG) of Bluetooth*. Está estandarizada por la IEEE bajo el 802.15.1 y compite con otros subgrupos por el mismo campo de operación. Entre sus ventajas se encuentra que no depende del protocolo IP, sino que el mismo asigna un direccionamiento. (Parziale, et al., 2006)

Aplicado en celulares, ratones, teclados e infinidad de dispositivos, está basado en el modelo maestro –esclavo y se deben satisfacer dos condiciones para poder establecer la comunicación. La primera es que todos los dispositivos se deben

conocer, y la segunda, se requiere de un circuito preestablecido. (Parziale, et al., 2006)(Labioud, Afifi, & De Santis, 2007)

Se manejan dos versiones de Bluetooth, la primera que utiliza GFSK como técnica de modulación, permitiendo un ancho de banda de 1 Mbps y un alcance de hasta 10 m. La segunda versión modula en FSK alcanzando velocidades de 2 Mbps y una variación de esta versión modula por 8PSK para llegar a 3 Mbps en velocidad de transmisión de datos. Ambas versiones transmiten en la banda de los 2,4 GHz en 79 canales distintos, cada con un ancho de banda de 1 MHz. (Parziale, et al., 2006)

Capítulo III

Metodología

En el marco de la metodología con la que se ha estado realizando este proyecto de grado, se ha decidido dividir el trabajo en cuatro fases de ejecución bien definidas. Se puede mencionar en este punto, que las cuatro etapas establecidas como metodología de trabajo son atemporales, ya que existirán actividades pertenecientes a distintas fases del proyecto, que serán trabajadas de manera simultánea.

La primera fase, fase de documentación ha sido trabajada durante todo el tiempo de ejecución del proyecto, ya que la revisión y análisis de conceptos teóricos es fundamental para una buena toma de decisiones y realización de acciones. En esta fase se habrán estudiado las distintas maneras de realizar una corrección de errores de la señal G.P.S., acción crucial en el funcionamiento exitoso de este proyecto.

La segunda fase del proyecto se ha definido como fase de estudio y diseño, ya que a partir de las investigaciones realizadas en la primera fase, como los métodos de corrección posibles, se tomarán decisiones en torno a los equipos disponibles, tecnologías de comunicación que ofrecen, y posteriormente, se diseñará el sistema a implementar.

También incluirá una serie de estudios prácticos del comportamiento del sistema G.P.S. bajo diferentes escenarios, comprobando así todos los fundamentos teóricos estudiados en la fase anterior.

La fase de implementación comprende todas las acciones tomadas a partir del diseño realizado en la segunda etapa, hasta llegar al producto.

Finalmente, una cuarta etapa propuesta, llamada fase de pruebas, comprenderá la realización de distintos tipos de pruebas al sistema final para comprobar su

funcionamiento y posibles condiciones de trabajo, variantes o fallas que pueda este presentar.

III.1 Fase de documentación

Esta fase comprende un extenso estudio de la tecnología G.P.S., desde los conceptos más básicos que sirvan para tener una clara idea del producto al que se quiere llegar, las ventajas y desventajas del mismo, las razones por las cuales se presentan errores de precisión en este sistema, y llegando hasta las diferentes técnicas existentes de corrección de errores en el sistema de ubicación.

A medida que se ha ido avanzando en el desarrollo de este proyecto, esta fase siempre ha estado presente, ya que cuando se realiza el diseño o se ejecutan acciones, siempre se presentan dudas sobre cuál puede ser la mejor manera de llevar a cabo un procedimiento, y el por qué de realizarlo de una manera u otra.

Asimismo, en este punto se estudiarán las distintas técnicas de corrección diferencial aplicables a éste proyecto planteado, con sus distintos requerimientos de sistema y programación. De esta manera se podrá abordar la siguiente fase, tomando en cuenta las necesidades y exigencias que llevan cada uno de los métodos de corrección, contemplando siempre el tiempo que se tiene para la realización total del proyecto.

III.2 Fase de estudio y diseño.

En esta fase se contempla la realización y cumplimiento de dos de los objetivos específicos que se plantean en este Trabajo Especial de Grado. Estos se basan en la toma de muestras de los distintos comportamientos que puede presentar el sistema G.P.S. durante el proceso de determinación de la ubicación de un módulo, en

distintas situaciones y escenarios que pueden afectar el sistema, y el estudio estadístico de estas pruebas.

Esta fase, igualmente comprende una parte de investigación de mercado en búsqueda de los dispositivos que mejor se adapten a las propuestas de arquitectura del sistema que se tienen.

Ya habiendo definido el tipo de módulos que se van a utilizar para la ubicación a través del sistema de localización G.P.S., y habiendo conocido y analizado sus aspectos técnicos, se podrá empezar a diseñar el sistema, tomar decisiones en materia de lenguajes de programación, requerimientos del sistema de procesamiento, medio de comunicación, y algunos otros factores que formarán parte importante de este sistema planteado.

Esta fase culminará con un esquema concreto del sistema que se desea implementar, habiendo definido cada uno de los componentes y sus distintos parámetros.

III.3 Fase de implementación.

Esta tercera fase del proyecto especial de grado en realización comprende toda la implementación del diseño anteriormente realizado. Esto significa que luego de realizada esta fase, el producto va a estar listo para la realización de las pruebas finales que comprueben las teorías propuestas e implementadas.

Esta fase se iniciará con la programación de software del equipo de procesamiento de los datos. Que incluye el módulo de obtención de información de los terminales móviles, y del terminal de referencias. Asimismo, incluirá la obtención del error a partir de los datos la estación de referencia, y finalmente la aplicación de este error para la corrección de los datos de los terminales móviles.

En el siguiente paso se realiza la programación de software de los terminales móviles de telefonía celular; de una aplicación que permita obtener la información de ubicación que el equipo recibe de los satélites G.P.S., en conjunto con el envío de estos datos al procesador de datos. El programa que se instalará sobre los terminales de telefonía móvil, tanto el de referencias como los módulos G.P.S. de usuario, será bastante similar, ya que su función principal es la de obtener información de posicionamiento generada por los satélites.

III.4 Fase de pruebas.

Esta última fase del proyecto es decisiva y se realiza en conjunto con la fase tres, ya que durante la implementación del diseño se tienen que ir realizando pruebas específicas de los distintos módulos que componen el sistema. Al final de la tercera fase, las pruebas son mucho más importantes, ya que son las que dictan la verdadera eficiencia del producto.

Capítulo IV

Desarrollo

Durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, así como la metodología lo indica, se hizo una división en cuatro fases bien definidas.

Debido a que esta estructura de trabajo es atemporal, existen partes del desarrollo que se han incluido dentro de algunas fases, pero que fueron ejecutadas luego de otras. Es un ejemplo para esta aclaración el hecho de que la fase de documentación estuvo presente a lo largo de todas las demás fases de trabajo, sobre todo la revisión de conceptos.

IV.1 Fase de documentación

La fase de documentación inició con una revisión bibliográfica del sistema G.P.S. Estableciendo previamente que este proyecto es producto del trabajo con diferentes herramientas, es el sistema G.P.S. el protagonista del mismo, ya que es a través del cual se han ido tomando todas las demás decisiones. Es por esta razón, que el estudio teórico estuvo fundamentalmente sentado sobre las bases de las teorías del Sistema de Posicionamiento Global, siempre considerando todas las posibles soluciones que las distintas fuentes bibliográficas planteaban en materia de correcciones diferenciales.

Para llevar a cabo la propuesta era de suma importancia el comprender a fondo este método de posicionamiento, ya que éste constituye la base del diseño que se deseaba implementar.

El estudio del sistema G.P.S. comprendió tres aspectos fundamentales. El primero fue su arquitectura; todos los elementos que constituyen este método. En

segundo lugar se dispuso a comprender el funcionamiento del sistema; como todos esos dispositivos interactuaban, de manera de lograr el objetivo principal que es determinar la posición de un objeto. Una vez entendidos los conceptos relacionados con la operación del sistema, surgió el tercer eje de esta investigación que fue el error, sus diferentes causas y las variadas consecuencias que pudiera éste tener.

A partir de este punto, se dispuso a realizar una investigación sobre las diferentes técnicas de corrección de errores sobre el sistema G.P.S. existentes.

Basándose en factores como la efectividad y la factibilidad de implementación, se decantó por una de las técnicas de G.P.S. diferencial, o D.G.P.S. por sus siglas en inglés, como el método elegido para realizar la corrección de errores.

Para aplicar la teoría sobre este sistema de funcionamiento, se realizó un estudio a fondo de los cálculos necesarios para poder conseguir una diferencia aplicable sobre las demás posiciones y así generar una corrección efectiva del error.

Ya teniendo una base bien definida de las diferentes teorías de corrección diferencial, habiendo revisado los métodos de la diferencia simple entre receptores, la doble y la triple diferencia observables. Estos métodos de corrección diferencial se estudiaron en sus dos formas, por pseudorangos y por fases de las portadoras.

La decisión del método de corrección se decidió postergar, ya que mientras más efectivos son los métodos, también se hacen más complejos de implementar, cosa que había que considerar al momento de la implementación sobre dispositivos G.P.S. basados en terminales de telefonía móvil.

Una vez hecha la elección del sistema operativo móvil con el cual se iba a trabajar (Fase de Estudio y Diseño), y estudiar los diferentes métodos de acceso a través del sistema operativo del terminal móvil a los datos provenientes del módulo

G.P.S. instalado sobre estos, se decidió utilizar las diferencias simples entre receptores a partir de los datos de posicionamiento de la estación de referencia.

Este método, como la teoría lo establece, es el más sencillo de implementar entre los métodos de correcciones diferenciales estudiados. Se basa en conseguir la diferencia entre la posición generada por el sistema G.P.S. en la estación de referencia, y aplicar esta sobre las posiciones de los terminales móviles a corregir.

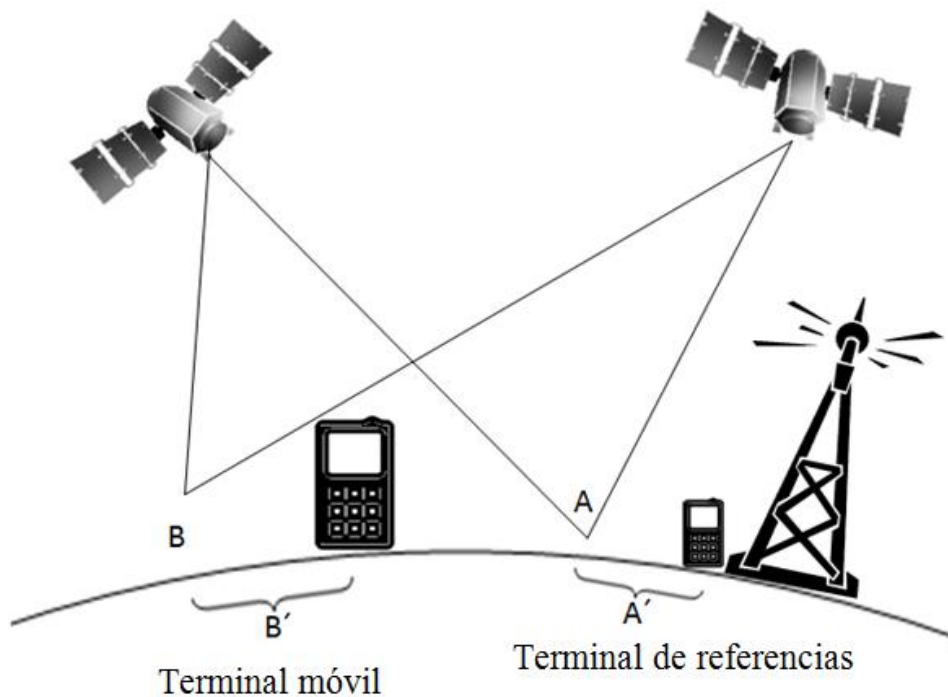


Figura 6: Método de corrección aplicado.

Extraído de: Realización propia.

A partir de la imagen mostrada anteriormente, se puede explicar el método de corrección diferencial a aplicar. Dada una transmisión G.P.S. cualquiera, se puede definir el error presentado en el terminal de referencias como A' , como la diferencia entre el punto A , definido por las coordenadas dictadas por el sistema G.P.S., y la posición real del terminal.

En teoría, si el terminal de referencias está recibiendo la señal de los mismos satélites que el terminal móvil, este error definido como A' será igual a B' . A partir de esto, se aplica esta diferencia sobre la coordenada B, consiguiendo así la corrección diferencial sobre el móvil.

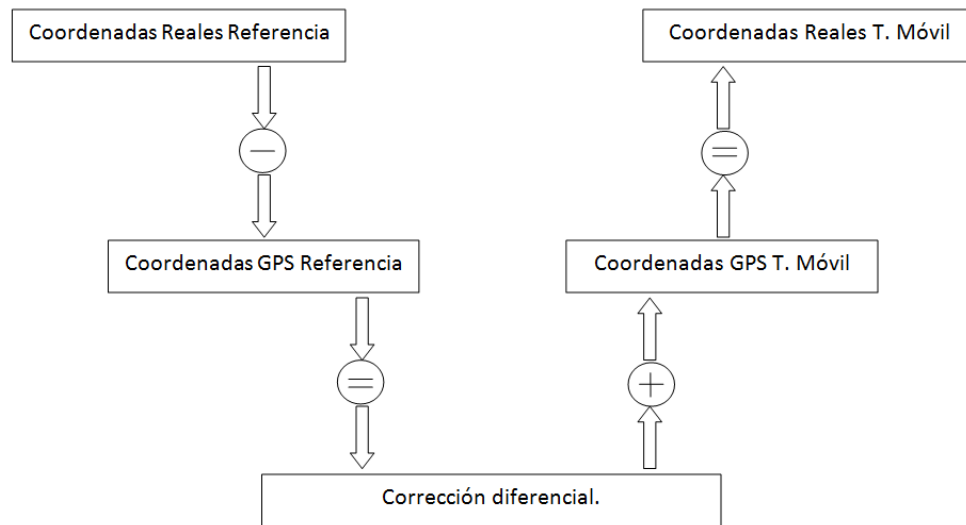


Figura 7: Cálculo de correcciones realizado.

Extraído de: Realización propia.

En la figura anteriormente mostrada se puede observar cómo se aplica la corrección diferencial sobre la posición obtenida por los terminales móviles a partir de las señales G.P.S. Se substraen las coordenadas G.P.S. obtenidas en el terminal de referencia (latitud menos latitud, longitud menos longitud) de las coordenadas reales, y la diferencia que se obtiene se adiciona algebraicamente a las coordenadas G.P.S. obtenidas en el terminal móvil, generando así unas coordenadas que se acercan mucho más a la posición real del objeto.

IV.2 Fase de estudio y diseño

En esta etapa se realizó el esbozo de la arquitectura que se iba a utilizar para realizar la corrección de errores fundamentándose en la técnica D.G.P.S. La arquitectura establecida por este método es bastante simple, consta de un terminal móvil que envía su posición a otro dispositivo que la corrige. No obstante, fue necesario un proceso de comparación para definir cada uno de los parámetros del esquema a utilizar.

En primer lugar se determinó el dispositivo móvil a utilizar. Como características fundamentales estaban: el tener un módulo G.P.S. para obtener la localización, la capacidad que ofrecía el dispositivo para la manipulación de los datos, y el estar dotado de una interfaz que permitiera la transmisión de la información posicional al procesador de datos de manera inalámbrica. Esto último sumado a la capacidad que ofrece el dispositivo para la manipulación de los datos.

Luego de evaluar las opciones disponibles en el mercado, se escogió para la mencionada instancia del diseño, un dispositivo de telefonía móvil con sistema operativo Android con módulo G.P.S. adaptado, por ser aquél que mejor cumplía con las condiciones previamente mencionadas.

A partir de éste punto, con un módulo definido, se realizaron una serie de pruebas del Sistema de Posicionamiento Global, con el fin de encontrar los márgenes de error prácticos que el sistema ofrecía con estos equipos de S.O. Android que se eligieron anteriormente.

Primeramente se hizo un estudio cuya finalidad era la de comprobar de manera práctica lo que estipula la teoría G.P.S. acerca del error mínimo que este sistema puede presentar. Para ello se situó el teléfono celular en un punto y se obtuvo su localización numerosas veces. Este proceso se realizó bajo distintas condiciones de nubosidad, a distintas horas del día, ya que, de acuerdo con la teoría, este factor hacía que el error variara. Lo siguiente fue comparar los valores obtenidos contra los

valores reales de la posición, lo cual arrojaba el error que presentaba cada medición. Se plasmaron todos estos resultados sobre una tabla comparativa y se procedió a sacar conclusiones.

Luego de esto, se hizo una toma de posiciones G.P.S. de coordenadas reales conocidas, y escenarios diferentes. Entre estos se encontraba lugares rodeados de edificaciones que podrían bloquear de gran manera el paso de las señales provenientes de los satélites. Estas pruebas se compararon de igual manera con todas las pruebas anteriormente realizadas, las cuáles se llevaron a cabo en lugares abiertos, para destacar las diferencias en cuanto al error que se pueden presentar dentro de este tipo de escenarios.

Posteriormente se realizaron pruebas basadas en colocar el terminal móvil en un punto fijo, con coordenadas reales conocidas, y obtener su localización G.P.S. Esto se hizo para observar las diferencias que había entre las mediciones que se obtenían, específicamente cómo variaba el error entre una y otra, y así determinar la estabilidad y la consistencia que presenta el módulo G.P.S. del teléfono celular.

Por último, se hizo una comparación entre los teléfonos celulares “Galaxy S I” y “Galaxy S II” ambos de “Samsung”. Se eligieron estos dos dispositivos porque presentaban las características que se habían definido para los terminales móviles y de referencia, además del hecho de que ambos estaban a disposición. La comparación consistió en tomar varias medidas de localización en un mismo punto y luego compararlas contra los valores verdaderos, obtenidos desde el programa “Google Earth”, para calcular el error en la medición, y de esta forma determinar cuál de los dos dispositivos era el más acertado. Estas pruebas se hicieron siempre basándose en la lógica de que dos módulos de G.P.S. que se encuentren en el mismo punto geográfico al mismo instante de tiempo deberían arrojar valores de ubicación bastante similares, si no exactamente iguales.

Después de realizadas todas estas pruebas sobre el Sistema de Posicionamiento Global, y los dispositivos utilizados, se procedió a trabajar sobre el diseño del sistema que se proyectaba implementar.

Se eligió una computadora como dispositivo de procesamiento de procesamiento de datos, ya que cumplía con todas las necesidades para la realizar la corrección de errores y facilitaba la escalabilidad, de ser requerida. A partir de esta elección surge un primer dilema, ¿Qué *software* utilizar para la corrección de errores? Se llevó a cabo una comparación entre tres entornos de desarrollo: LabVIEW, MATLAB y JAVA.

Luego de analizar a fondo las virtudes y las limitantes que ofrecen cada uno de los distintos programas, se eligió a LabVIEW para cumplir con la tarea del procesamiento de datos.

Otra de las incógnitas suscitadas en materia del procesador de datos, fue la de la obtención de su localización. Para lo cual se eligió un dispositivo de características similares a las del terminal móvil, con objeto de tener la máxima unificación entre ambas instancias del diseño.

Después se procedió a determinar el protocolo a utilizar para la transmisión de los datos entre el terminal móvil y el procesador de datos, así como también entre este último y el terminal de referencia. Se decidió utilizar Wi-Fi para logra el mencionado propósito. Se llegó a esta conclusión luego de estudiar las diferentes opciones disponibles para luego, basándose en criterios como facilidad de implementación, adaptabilidad al modelo TCP/IP y alcance, tomar la decisión.

Posteriormente la fase de diseño se eligió UDP por sobre TCP como protocolo de capa de transporte para la transmisión de datos, pensando a futuro en el cual se desea que el sistema pueda ser aplicado para correcciones en tiempo real, razón que eliminaba a TCP como opción.

El último reto enfrentado en esta fase de diseño era el de la sincronización, se necesitaba cerciorarse que entre las múltiples tramas que arribaban al procesador de datos, se estuvieran corrigiendo aquellas que se correspondían. Se hizo entonces una revisión teórica de los campos de la trama G.P.S. del sistema operativo Android y se hizo uso del campo llamado “mTime”, el cual contiene el tiempo en milisegundos que han pasado desde el 1 de enero de 1970

IV.3 Fase de implementación

La fase de implementación empezó una vez finalizado el esquema de todos los componentes que constituyen el sistema, y consistió en la creación y programación de todo el código que haría que todos los dispositivos se comportaran de la manera deseada. Esta fase está dividida en tres partes: el terminal de referencia, el terminal móvil y el procesador de datos.

IV.3.1 Terminal de referencia

Parte imprescindible para la corrección de localizaciones, es la obtención del error que se está presentando en la medición de la posición, en una determinada zona. En vista que el equipo encargado de procesar los datos no posee un módulo G.P.S., se decidió utilizar un dispositivo auxiliar que calculara la posición en la que se encuentre el procesador de datos, y que a continuación se la haga llegar a este último, de manera que pueda proceder al cálculo del error.

Se decidió entonces implementar un dispositivo con sistema operativo Android, para el cual se desarrollo un *software* que pudiera cumplir con todos los requerimientos antes mencionados.

El programa desarrollado tiene funcionalidades muy básicas, pero que requieren un conocimiento preciso del lenguaje de programación y del ámbito en el

que se está programando. Para la obtención de la posición del procesador de datos, se escribió un código que tiene dos funciones principales:

Lo primero es obtener constantemente y de manera ilimitada, en intervalos de un segundo, medidas de la posición del terminal de referencia, de forma de tener en todo momento un valor actualizado del error que se está presentando en el sistema. Esta medición constituye la base sobre la cual se va a determinar el error que está presentando el sistema G.P.S., consecuentemente resulta de vital importancia que ésta medida sea lo más acertada posible.

La segunda función se lleva a cabo una vez que se dispone de la posición del terminal de referencia, se envía esta información al puerto 6666 del procesador de datos sobre de la red Wi-Fi. Este procedimiento se repite para cada una de las mediciones que se obtienen.

Todos estos procesos debían ser transparentes para el usuario, por lo que se diseño una interfaz gráfica que hiciera simple la comunicación entre el usuario y el programa.

Entrando en detalles técnicos del programa, una de las partes más importantes del funcionamiento de éste parte de la configuración de la dirección IP del servidor de procesamiento de datos. Esta se ingresa una vez abierto el programa, en una línea de texto que muestra en la interfaz gráfica.

El programa del terminal de referencias también muestra un botón para detener el envío de actualizaciones de ubicación de G.P.S.

IV.3.2 Terminal móvil

El terminal móvil utiliza en esencia el mismo código que el terminal de referencia con ligeras discrepancias. Al igual que este último, el terminal móvil obtiene y envía la información sobre su posición, según su módulo G.P.S., al procesador de datos, con algunas diferencias. La primera es que en vez de mandar

ilimitadamente su posición al procesador de datos, lo hace un número contado de veces, ya que solo se desea corregir una medida. Luego de realizar un estudio sobre la estabilidad del sistema, se decidió que los terminales móviles recibirían 5 actualizaciones de posicionamiento, enviando al procesador de datos la última de estas.

Otra de las cosas que difiere en el código del terminal móvil, es que para enviar las mediciones al procesador de datos utiliza el puerto 5555 como destino en la trama UDP. Se hace esto para tener bien delimitados los puertos por los que el corrector de errores escucha a los terminales móviles y al terminal de referencia.

También se tuvo que modificar la interfaz gráfica para adaptarla a este terminal, añadiéndole un espacio de texto, llamado “Etiqueta” donde el usuario tiene que colocar un identificador para sus actualizaciones. De esta manera, el procesador de datos puede almacenar cada una de las correcciones de ubicación con una etiqueta diferente, haciéndose mucho más sencillo el análisis de la información posteriormente.

IV.3.3 Procesador de datos

Ya habiendo definido toda la estructura de los programas que se ejecutan sobre los módulos de G.P.S., tanto los terminales móviles como el terminal de referencia, se pudo desarrollar el programa que lee y procesa toda la información proveniente de los módulos.

Inicialmente, y previo a realizar la programación del software de procesamiento de los datos, se hizo un diseño y planificación del funcionamiento de éste. Esta planificación dividió el programa en tres partes, la primera fue la sincronización y el manejo de los datos provenientes del terminal de referencia. La segunda fue sobre los datos provenientes de los terminales móviles. La tercera parte de este programa se basó en la programación del cálculo de los datos, partiendo de la

elección del sistema de corrección que se hizo después del estudio, en la primera fase de este programa.

IV.3.3.i Módulo de sincronización y manejo del terminal de referencia.

Ya habiendo establecido una planificación para la realización del código de programación del *software*, lo primero que se ha tenido que definir, y que ha sido un paso general tanto para la sincronización del terminal de referencia como para la comunicación con los terminales móviles, ha sido la apertura de los puertos UDP para establecer conexión con los equipos. Estos puertos se establecieron como puertos fijos, de manera que los programas puedan ser instalados y ejecutados sobre cualquier terminal móvil, y el programa de procesamiento de la data sobre cualquier computadora (con capacidades de conexión a redes WLAN) sin la necesidad de realizar una configuración previa. La única configuración que se tiene que hacer para establecer la comunicación entre los tres sistemas es ingresar la dirección IP que tiene asignada el procesador de datos.

En el caso del módulo de comunicación con el terminal de referencia, luego de habilitar el puerto de escucha, éste se programó de tal manera que cualquier información recibida sea almacenada en una matriz de dos dimensiones.

Para definir los campos a llenar en esta matriz, se tuvo que analizar el formato del paquete de información útil de G.P.S. que envían los dispositivos móviles con sistema operativo Android.

A partir de la definición de los datos que llevan los mensajes que envía el terminal de referencia con su ubicación G.P.S., se llenó la matriz. Esta contiene los datos hora, latitud, longitud, precisión, error de latitud, error de longitud y distancia.

La hora viene dada por la hora G.P.S. que recibe el terminal cada vez que el Sistema de Posicionamiento Global emite un mensaje. Esta hora se recibe originalmente como la cantidad de microsegundos transcurridos desde el 1 de enero

de 1970 según la hora del meridiano de Greenwich (UTC 0). Para cambiar este formato a la hora oficial de Venezuela (-4:30 UTC) para el momento de la transmisión, se convirtió esta cantidad de microsegundos al formato de horas minutos y segundos, y se le restaron las 4 horas con 30 minutos que tiene de retraso el huso horario de Venezuela.

La latitud y la longitud se reciben en el formato de grados en decimal.

Los campos error de latitud y error de longitud se definen a partir de la diferencia entre las coordenadas de ubicación real del terminal de referencia y las coordenadas que el sistema G.P.S. calcula sobre la posición de este dispositivo. Esta diferencia se calculó como la resta de la latitud real menos la latitud G.P.S., y la longitud real menos la longitud G.P.S.

A partir de este cálculo se obtuvo la información que se almacena en la matriz como error de latitud y error de longitud. Entre tanto, el campo distancia está definido por la distancia en línea recta que separa las coordenadas reales de las coordenadas G.P.S.

Este cálculo se realiza a través de las diferencias que hay entre las coordenadas. Cada coordenada representa el ángulo que se forma entre una línea divisoria de la tierra y el punto de ubicación, teniendo como vértice el centro de la tierra. En el caso de la latitud, es el ángulo entre el punto de ubicación y el ecuador, en el caso de la longitud es el ángulo entre la línea del meridiano de Greenwich y el punto en cuestión. A partir de esto, la fórmula para calcular la distancia entre dos puntos viene dada por:

$$D = \cos^{-1} \left(\cos \left(\left((90 - LAT1) * \frac{\pi}{180} \right) \right) * \cos \left(\left((90 - LAT2) * \frac{\pi}{180} \right) \right) + \sin \left(\left((90 - LAT1) * \frac{\pi}{180} \right) \right) * \sin \left(\left((90 - LAT2) * \frac{\pi}{180} \right) \right) * \cos \left(\left((LON1 * \frac{\pi}{180}) - (LON2 * \frac{\pi}{180}) \right) \right) \right) * 6371000$$

Figura 8: Ecuación de cálculo de distancia entre coordenadas.
Extraído de: Realización propia.

Como se explico anteriormente en el desarrollo del programa del terminal de referencia, este está configurado para enviar un dato cada segundo. De esta manera, se programo la matriz que almacena los datos, para que esta mantenga 60 datos, así se puede garantizar que cada 60 segundos estos datos de corrección diferencial puedan ser renovados, y no se ocupe tanto espacio de memoria ni capacidad de procesamiento al momento de relacionar los datos de referencia con los datos de los terminales móviles a corregir, y a la vez, mantener información sobre las últimas actualizaciones del terminal de referencia.

IV.3.3.ii Módulo de sincronización y manejo de los terminales móviles.

De la misma manera que sucede con el manejo de la información del terminal de referencia, lo primero que se llevo a cabo para asegurarse que los mensajes enviados por los terminales móviles llegaran al procesador de datos fue abrir un puerto UDP (puerto 5555) por donde entraran todos los datos provenientes de los diferentes terminales que forman parte de la red de corrección de datos.

Por otra parte, se definió que el formato de datos recibidos de estos terminales sería el mismo que el mensaje que se recibe del terminal de referencia. La única diferencia que se tendrá, es que cada mensaje recibido de un terminal móvil tiene una etiqueta que identifica a este terminal móvil. Esta etiqueta la establece el usuario del terminal, y cuando se inicia la transferencia de los datos de ubicación, ésta precede el resto del mensaje. Cuando la data llega al procesador, la etiqueta identifica que el dato de ubicación proviene de ese terminal móvil. De esta manera, en la matriz de posiciones procesadas y corregidas, la primera columna se designa para esta etiqueta de identificación.

La corrección de los datos provenientes de los terminales móviles, se realiza inmediatamente después del procesamiento de estos.

IV.3.3.iii Corrección de datos.

Para el cálculo de las correcciones a aplicar, el primer paso que se llevó a cabo fue adquirir las coordenadas reales del procesador de datos. Para ello se requería un método que proporcionara estas coordenadas sin ningún tipo de error, ya que de la fidelidad de estas medidas dependen todos los cálculos subsiguientes, y por ende la precisión del sistema.

Se decidió entonces implementar "*Google Earth*", como herramienta que cumpliera con el anterior propósito, de la siguiente manera.

Primero se procede a centrar la pantalla en la ubicación actual del procesador de datos. A continuación se elige un punto cercano y unívoco, donde será colocado el procesador de datos para la realización de todos los procedimientos posteriores. Finalmente se obtienen del software las coordenadas del punto elegido, que serán las que se tomara como "coordenadas reales" en el cálculo de las correcciones a aplicar.

Es importante destacar que el programa utilizado está hecho a base de imágenes tomadas desde satélites, por lo tanto, hay lugares donde la resolución de dichas imágenes es peor que en otros, lo cual puede influir en la precisión de las medidas.

Una vez establecida la comunicación con el terminal de referencias, y habiendo definido en el procesador de datos ese punto geográfico donde se encuentra este terminal, lo que se hace restar a éste las coordenadas provenientes del terminal de referencia, obtenidas a partir del sistema G.P.S., y es esta la diferencia, o error, que posteriormente se adiciona a las coordenadas del o los terminales móviles para determinar su ubicación real.

En cada actualización del terminal de referencias, la cuales se producen cada segundo, se aplica inmediatamente la diferencia, para hallar el error, el cual se almacena en la matriz de posiciones de referencia.

Por otro lado, en el puerto 5555, se están recibiendo mensajes de posicionamiento G.P.S. provenientes de los terminales móviles. Cada vez que se recibe un mensaje, el cual lleva en su segundo campo una etiqueta con la hora G.P.S., se revisa la matriz de posiciones de referencia, en su última actualización, la cuál será la más cercana en tiempo a la actualización del terminal móvil. A partir de esta entrada de la matriz, se toman los campos de error de latitud y error de longitud, los cuales son sumados algebraicamente a la latitud y longitud G.P.S. del terminal móvil, generando así una posición corregida, y mucho más cercana a la posición real.

IV.3.3.iiii Mapeo de ubicaciones.

Cada vez que se ejecuta el programa, éste genera un archivo de texto en el directorio que el usuario específico, el cual contiene todas las posiciones corregidas que se generan durante la ejecución del sistema.

Existe otro programa, que se encarga de ubicar sobre un mapa, a través de una conexión a internet, las posiciones almacenadas en los archivos que el usuario desee mapear. Este software se encarga, a través de una aplicación web de “Google Maps”, generar mapas estáticos, o imágenes de mapa, de las ubicaciones que se deseen visualizar.

IV.4 Fase de pruebas

En esta etapa se hicieron diferentes estudios tanto del sistema que se construyó, como pruebas de limitaciones del mismo, que permitieron generar conclusiones y recomendaciones sobre la implementación realizada, y futuras mejoras que se pueden plantear.

Estas pruebas empezaron básicamente por la comprobación de la comunicación y sincronización entre el terminal de referencia y el equipo procesador

de datos, luego se pasó a comprobar la comunicación con los terminales móviles, y finalmente una serie de pruebas del funcionamiento del sistema como un todo.

Capítulo V

Resultados

Luego del desarrollo de los planteamientos realizados en el marco metodológico, y siguiendo lo establecido según el cronograma, y el cuadro de objetivos a cumplir para la realización de este Trabajo Especial de Grado, se han ido generando resultados.

Estos resultados, son el punto final del desarrollo explicado anteriormente, y muestran claramente el logro de los objetivos planteados a través de la metodología establecida.

A continuación se exponen los resultados clasificados por objetivo cumplido.

V.1 Datos del funcionamiento del equipo G.P.S. y estudio de los mismos.

La primera parte de este estudio realizado sobre el comportamiento del sistema G.P.S. en general, se basó en tomar datos de posicionamiento desde un mismo punto geográfico, y bajo diferentes condiciones climatológicas, las cuales afectan de cierta manera la integridad de la señal.

Todos estos datos tomados desde el mismo sitio, se hicieron apagando y encendiendo el módulo G.P.S. para cada cálculo, para evitar que el sistema muestre datos almacenados, y así garantizar que estos provienen directamente de las señales de los satélites.

La primera tabla, a continuación mostrada, evidencia el daño de la señal en condiciones de fuertes lluvias. Llegando a tener un error máximo de casi 31 metros.

Coordenadas reales		Coordenadas GPS		Error (mts)
10.456188000000	-66.874254000000	10.456147545430	-66.874534349230	30.984123821266
10.456188000000	-66.874254000000	10.456147523430	-66.874443242430	21.177169059117
10.456188000000	-66.874254000000	10.456148423920	-66.874445238340	21.369722588112
10.456188000000	-66.874254000000	10.456159382930	-66.874635345330	41.820911424975
10.456188000000	-66.874254000000	10.456132934820	-66.874373492420	14.429852999201
10.456188000000	-66.874254000000	10.456164234920	-66.874434423420	19.905195104574
10.456188000000	-66.874254000000	10.456192348240	-66.874432423540	19.516536162864
10.456188000000	-66.874254000000	10.456144234920	-66.874425345340	19.357956752431
10.456188000000	-66.874254000000	10.456200124320	-66.874443253530	20.738528379042
10.456188000000	-66.874254000000	10.456034230420	-66.874434535230	26.116526196790

Tabla 1: Recolección de datos de G.P.S. Condiciones de lluvia.

Extraído de: Realización Propia.

Es evidente como los datos se ven bastante deteriorados a causa de la condición climática que se presenta, si se comparan estos con el error teórico del sistema, que dice que en un 95% de las tomas mostradas, el error promedio es igual a 5 metros.

Hay que destacar en este punto, que el cálculo del error se hace con una ecuación especificada en el desarrollo de este proyecto, que permite obtener la distancia en metros que existe entre dos puntos cualquiera dadas sus coordenadas.

Las siguientes pruebas, mostradas en la Tabla 2, fueron realizadas bajo techo. Estos experimentos se basaron en ubicarse en lugares que solo tuvieran un techo de madera de pormedio que estuviese bloqueando la visión directa a los satélites. Es decir, era sólo este material el que influiría en el deterioro de las señales y afectaría la precisión de los datos obtenidos.

Las condiciones climáticas al momento de estos cálculos fueron de cielo totalmente despejado. En este punto hay que aclarar que todas las condiciones

posteriores a los cálculos mostrados en la Tabla 1 fueron realizados con el cielo totalmente despejado.

Coordenadas reales		Coordenadas GPS		Error (mts)
10.456206000000	-66.874371000000	10.456218200000	-66.874566000000	21.366348310389
10.455837000000	-66.874707000000	10.456023216248	-66.874633789063	22.200249488906
10.455985000000	-66.874801000000	10.456261300000	-66.874789400000	30.749365684441
10.456001000000	-66.875480000000	10.455892800000	-66.875750600000	31.942306807343
10.456104000000	-66.874341000000	10.456211800000	-66.874205700000	19.041569144319

Tabla 2: Operación del sistema G.P.S. bajo techo.

Extraído de: Realización Propia.

La figura a continuación muestra un deterioro de la señal bastante grande, si se compara con los 5 metros esperados como margen de error promedio en un cálculo de posición del sistema.

Hay que destacar sobre esta parte del estudio, que se hicieron 5 tomas únicamente ya que se consideró que hacer una conclusión real a partir de estos cálculos hubiese tenido que llevar un estudio más profundo del lugar, los materiales que las señales estaban traspasando, el grosor de los mismos, y una serie de afecciones que toman papel en estas mediciones. Es por esto que lo único que se buscó fue tener una idea de que tanto se podría ver afectada la señal.

Si se compara el margen de error obtenido en esta parte del estudio, con el error que se obtuvo en la Tabla 1, donde los cálculos se realizaron con condiciones de lluvia y cielo totalmente nublado, se podría llegar a decir que el margen de error es bastante parecido, y que por tanto el funcionamiento del sistema G.P.S. bajo estas condiciones climáticas ya mencionadas, o bajo un techo simple de madera, se ve afectado en la misma medida.

Las mediciones posteriores se realizaron a diferentes horas del día, con el cielo totalmente despejado siempre. Para conseguir esto se tuvieron que hacer pruebas en días diferentes, ya que durante el día el cielo se nublaba y se despejaba varias veces. Al final de las pruebas, se aseguró de que las pruebas cubrían todas las fases del día, amanecer, media mañana, medio día, media tarde, anochecer, y media noche. A estas pruebas no se ha asignado hora del día en la tabla que se mostrará a continuación, ya que no se creyó que fuese necesario, debido a que los resultados muestran claramente que la hora no afectaba de ninguna manera las mediciones realizadas.

Coordenadas reales		Coordenadas GPS		Error (mts)
10.503396000000	-66.872237000000	10.503442985423	-66.872254309530	5.556756895615
10.503396000000	-66.872237000000	10.503399453522	-66.872289400042	5.742604706065
10.503396000000	-66.872237000000	10.503363254251	-66.872242342359	3.689064015087
10.503396000000	-66.872237000000	10.503352385235	-66.872249141242	5.027090716680
10.503396000000	-66.872237000000	10.503382349234	-66.872200342357	4.285779347107
10.503396000000	-66.872237000000	10.503399432292	-66.872269432593	3.567344621223
10.503396000000	-66.872237000000	10.503371293141	-66.872279834294	5.429601921863
10.503396000000	-66.872237000000	10.503364342401	-66.872252953459	3.928073432459
10.503396000000	-66.872237000000	10.503353423424	-66.872253453953	5.064600174676
10.503396000000	-66.872237000000	10.503354234924	-66.872237395235	4.644073313196
10.503396000000	-66.872237000000	10.503359240124	-66.872262345935	4.938460834830
10.503396000000	-66.872237000000	10.503351041434	-66.872262584353	5.728462273197
10.503396000000	-66.872237000000	10.503391434235	-66.872282434295	4.993813250532

Tabla 3: Pruebas G.P.S. realizadas en el mismo punto a diferentes horas del día.

Extraído de: Realización propia.

En la tabla que se muestra anteriormente, se puede observar, así como ya se estableció que la variación entre las mediciones a distintas horas del día no tiene una

relación nada concluyente, pudiendose establecer que la hora no es un factor que afecte directamente el funcionamiento del sistema.

Una cosa que si se puede extraer de esta prueba, es el cumplimiento del margen de error promedio que teóricamente tiene el Sistema de Posicionamiento Global. Si sacamos un promedio del error en metros que se consiguió entre todas las mediciones que se hicieron, este va a estar a penas por debajo de los 5 metros, lo que cumple con lo estudiado.

Las siguientes pruebas realizadas, se hicieron con el objetivo de estudiar la estabilidad del sistema, así como la calidad del equipo que se estaba utilizando. Para esto lo que se hizo fue obtener varios valores de posicionamiento consecutivos, sin apagar ni deshabilitar el módulo de G.P.S. y observar como se iba estabilizando la señal.

Coordenadas reales		Coordenadas GPS		Error (mts)
10.503420000000	-66.872237000000	10.503329420462	-66.872227136046	10.129645228696
10.503420000000	-66.872237000000	10.503354985267	-66.872246498242	7.303850711320
10.503420000000	-66.872237000000	10.503378957510	-66.872260831296	5.254992472313
10.503420000000	-66.872237000000	10.503443791531	-66.872292850167	6.653603193079
10.503420000000	-66.872237000000	10.503462357447	-66.872270219028	5.947679370235
10.503420000000	-66.872237000000	10.503462357447	-66.872270219028	6.653603193079
10.503420000000	-66.872237000000	10.503462357447	-66.872270219028	5.947679370235
10.503420000000	-66.872237000000	10.503462357447	-66.872270219028	5.947679370235
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060

Tabla 4: Estabilidad del sistema. Prueba 1.

Extraído de: Realización propia.

Coordenadas reales		Coordenadas GPS		Error (mts)
10.503420000000	-66.872237000000	10.503494013422	-66.872231034123	8.255550802601
10.503420000000	-66.872237000000	10.503350149242	-66.872246498242	7.836044836096
10.503420000000	-66.872237000000	10.503394294249	-66.872275992942	5.132655615100
10.503420000000	-66.872237000000	10.503402678296	-66.872279936513	5.073490123895
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463354352	-66.872242001424	4.850998648618

Tabla 5: Estabilidad del sistema. Prueba 2.

Extraído de: Realización propia.

Coordenadas reales		Coordenadas GPS		Error (mts)
10.503420000000	-66.872237000000	10.503329420462	-66.872227136046	10.129645228696
10.503420000000	-66.872237000000	10.503354985267	-66.872246498242	7.303850711320
10.503420000000	-66.872237000000	10.503378957510	-66.872260831296	5.254992472313
10.503420000000	-66.872237000000	10.503402678296	-66.872273236513	4.404015626030
10.503420000000	-66.872237000000	10.503419190645	-66.872273404151	3.981627593794
10.503420000000	-66.872237000000	10.503443791531	-66.872292850167	6.653603193079
10.503420000000	-66.872237000000	10.503457412124	-66.872282037511	6.445820101093
10.503420000000	-66.872237000000	10.503462357447	-66.872270219028	5.947679370235
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060
10.503420000000	-66.872237000000	10.503463740461	-66.872248677537	5.027987052060

Tabla 6: Estabilidad del sistema. Prueba 3.

Extraído de: Realización propia.

En las tablas anteriores, se puede visualizar un estudio que se realizó sobre la estabilidad del módulo G.P.S. que se estaba utilizando. Para esto se decidió realizar más de una prueba, y es por esto que hay 3 tablas con experimentos del mismo tipo y bajo las mismas condiciones, porque se quería sacar una conclusión a partir de la cual trabajar.

Estas pruebas cuyos resultados se muestran en las tablas 4,5 y 6, muestran el comportamiento del equipo, tomando datos del sistema G.P.S. estando totalmente inmóvil. Se puede notar como los primeros datos que este toma varían ligeramente, hasta el equipo darse cuenta que su posición es siempre la misma, logrando así una estabilidad.

Lo que sucede es lo siguiente, a medida que el equipo va tomando los primeros datos, éste sufre errores por causa del efecto multiruta, y errores ambientales que afectan muy ligeramente a la señal, haciendo que la posición varíe ligeramente. El módulo receptor no pueda notar que se encuentra en estado de inmovilidad total debido a esta causa. Una vez éste empieza a recibir actualizaciones, y se da cuenta que su posición varía de manera muy ligera, asume que las razones de la variación no son debido a que está en movimiento, y empieza a enviar la última posición conocida, dando la impresión al usuario de que el receptor en verdad está recibiendo siempre la misma actualización.

Equipo	Coordenadas reales		Coordenadas GPS		Error (mts)
Samsung Gs	10.456198000000	-66.874179000000	10.456398234525	-66.874168235535	22.296257585216
Samsung Gs2	10.456198000000	-66.874179000000	10.456167992525	-66.874164325258	3.701259300662
Samsung Gs	10.456198000000	-66.874179000000	10.456394643636	-66.874134634630	22.397488321798
Samsung Gs2	10.456198000000	-66.874179000000	10.456164579925	-66.874163432526	4.086631021975
Samsung Gs	10.456198000000	-66.874179000000	10.456332342533	-66.874145253252	15.387134649124
Samsung Gs2	10.456198000000	-66.874179000000	10.456164579925	-66.874163432526	4.086631021975
Samsung Gs	10.456198000000	-66.874179000000	10.456333254534	-66.874143523432	15.532006630389
Samsung Gs2	10.456198000000	-66.874179000000	10.456175245363	-66.874153454353	3.768823717399
Samsung Gs	10.456198000000	-66.874179000000	10.456332534543	-66.874150124142	15.289004784427
Samsung Gs2	10.456198000000	-66.874179000000	10.456156564565	-66.874174534635	4.633387218847

Tabla 7: Comportamiento de diferentes modelos de módulos G.P.S.
Extraído de: Realización propia.

En la Tabla 7, la cual se muestra anteriormente, se realizó una comparación entre dos terminales móviles con módulos G.P.S. Lo que se quería ver con este experimento en un principio era comprobar la teoría que plantea que dos terminales cualquiera que se encuentren en el mismo lugar en el mismo instante de tiempo deberían presentar las mismas coordenadas de ubicación extraídas del módulo de G.P.S.

Esta teoría es simple, ya que la manera en la que ambos obtienen los datos para saber su posición es la misma, y si se encuentran en el mismo lugar, pues las señales que reciben también deberían ser las mismas.

El estudio demuestra lo contrario. Lo que sucedió en este experimento fue básicamente que la calidad de los módulos G.P.S. no era la misma. La receptividad de las antenas probablemente no era igual, la calidad de los componentes no era igual, y por tanto uno presentaba mucho mayor margen de error que el otro en las mismas condiciones.

V.2 Sistema de comunicación y sincronización.

Como bien se estableció en el desarrollo de este proyecto, el sistema de comunicación utilizado está basado en mensajes UDP enviados sobre el protocolo IP, enviados sobre una red WLAN que integra tanto a los terminales móviles, como al terminal de referencia y al equipo de procesamiento de la data. Esta red WLAN está asentada en la tecnología Wi-Fi 802.11.

Todos los mensajes son enviados a la dirección IP del procesador de datos, quien tiene un puerto UDP abierto y configurado para los mensajes que este reciba del terminal de referencia, los cuales tendrán una frecuencia bastante alta, y otro puerto UDP abierto y configurado para recibir los mensajes de los terminales

móviles. Este otro puerto tiene mucha menos actividad, ya que los terminales actualizan su posición únicamente cuando los usuarios así lo desean.

V.2.1 Terminal de Referencias

En la figura a continuación, se muestra la interfaz grafica del programa instalado sobre el terminal de referencia. Esta toma es hecha con el programa en funcionamiento. Se hace notar claramente el mensaje de ubicación que el terminal de referencia está enviando al procesador de datos para el momento. También se puede apreciar el campo designado para establecer la dirección IP del procesador de datos, la cual será a la que se enviará el mensaje.

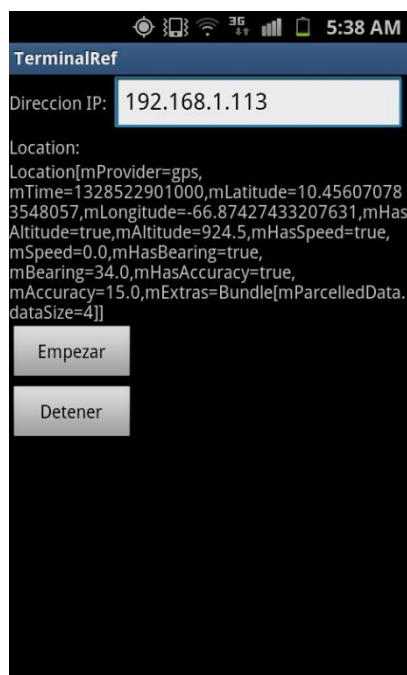


Figura 9: Interfaz Gráfica. Terminal de Referencias.

Extraído de: Realización propia.

Entre los campos que se incluyen en este mensaje de G.P.S. que el terminal está enviando al procesador de datos se tienen las variables “mTime”, “mLatitud” y “mLongitud”. Los otros datos que se envían, como se había definido en el desarrollo de este proyecto, están reservados para desarrollos posteriores.

El terminal de referencias transmitirá tantos valores de ubicación como sea posible, con frecuencia de 1 segundo, aunque una vez el equipo detecta que su posición es fija, verificará el cambio de posición del mismo cada 5 segundos, y los valores que envíe en segundos consecutivos serán el mismo valor, sin revisar el módulo G.P.S. por cambios de ubicación.

V.2.2 Terminal Móvil

La imagen siguiente, nos muestra la igualdad que tiene la interfaz de los terminales móviles con la del terminal de referencia. La gran diferencia gráfica se basa en el campo de la etiqueta. En este campo se define una etiqueta con la que el procesador de datos almacenará toda la información proveniente de este terminal.

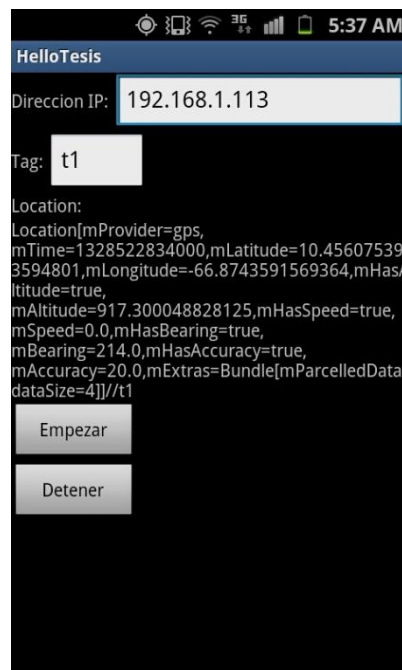


Figura 10: Interfaz Gráfica. Terminal Móvil.

Extraído de: Realización propia.

La otra diferencia importante, aunque no visible en la imagen, es la cantidad de datos que cada uno de los programas envía. Así como se estableció que el terminal de referencias envía una actualización de su posición cada segundo, los terminales

móviles envían únicamente cinco actualizaciones cada vez que el usuario presiona el botón de “empezar”. Posterior a la quinta actualización, y para que el usuario pueda volver a enviar datos de su ubicación, éste tendrá que detener el proceso con el botón que aparece en pantalla, y volver a iniciarlo.

La razón por la cual se decidió que se enviarían un total de cinco ubicaciones se debe a la estabilidad que logra tener el módulo G.P.S. después de tomar la quinta actualización del sistema de satélites. Las cuatro posiciones previas a esta tienen más probabilidades de presentar afecciones ajenas al sistema.

V.2.3 Procesador de datos

El procesador de datos es el terminal con más funciones de los tres equipos involucrados en el sistema. No sólo es el que se encarga de procesar la información proveniente del terminal de referencia y de los terminales móviles, sino de realizar los cálculos para la depuración del error.

Terminal de referencia					
Hora	Latitud GPS	Longitud GPS	Error de latitud	Error de Longitud	Distancia de correccion (mts)
2/6/2012 4:07:24 AM	10.4813576862216	-66.8794064875	-0.02518068622160	0.00512848756921	2855.56714156200041
2/6/2012 4:07:25 AM	10.4813576862216	-66.8794064875	-0.02518068622160	0.00512848756921	2855.56714156200041
2/6/2012 4:07:26 AM	10.4813576862216	-66.8794064875	-0.02518068622160	0.00512848756921	2855.56714156200041
2/6/2012 4:07:27 AM	10.4813576862216	-66.8794064875	-0.02518068622160	0.00512848756921	2855.56714156200041
2/6/2012 4:07:28 AM	10.4813576862216	-66.8794064875	-0.02518068622160	0.00512848756921	2855.56714156200041

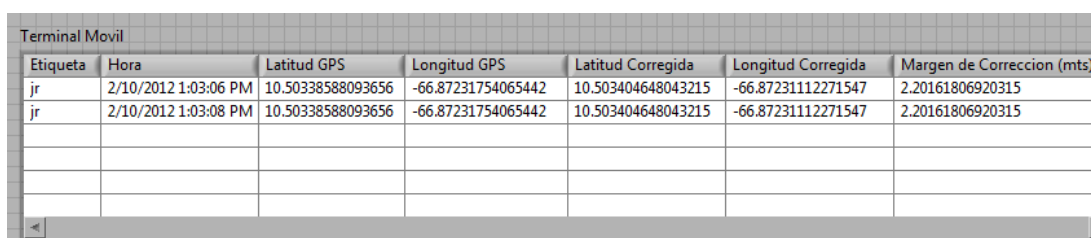
Figura 11: Comunicación entre Terminal de Referencias y Procesador de Datos.

Extraído de: Realización propia.

En la figura que se muestra anteriormente, se puede observar la tabla que se llena con todas las actualizaciones provenientes del terminal de referencia, notando así que cada una de estas se produce con un segundo de diferencia de la anterior. También es posible observar como la latitud y la longitud no han cambiado en ningún dígito, ni tampoco lo ha hecho el error de la latitud en los cinco segundos que pasaron durante esa toma de información.

Los datos de error de latitud y error de longitud, así como la distancia de corrección no son correctos, puesto que en la prueba en cuestión no se estaba realizando ningún enfoque en el error que se podía generar, sino únicamente haciendo revisión del funcionamiento del terminal de referencia y la sincronización y comunicación efectiva de éste con el procesador de datos.

En la figura que se muestra a continuación, se puede observar la obtención de datos que se realiza de los terminales móviles.



Etiqueta	Hora	Latitud GPS	Longitud GPS	Latitud Corregida	Longitud Corregida	Margen de Correccion (mts)
jr	2/10/2012 1:03:06 PM	10.50338588093656	-66.87231754065442	10.503404648043215	-66.87231112271547	2.20161806920315
jr	2/10/2012 1:03:08 PM	10.50338588093656	-66.87231754065442	10.503404648043215	-66.87231112271547	2.20161806920315

Figura 12: Comunicación entre Terminal Móvil y Procesador de Datos.

Extraído de: Realización propia.

En esta imagen se puede notar, a diferencia de la imagen anterior, el campo etiqueta. Este identifica a cada uno de los terminales móviles que forman parte de la red de equipos G.P.S. que utiliza el sistema de corrección de posicionamiento. Si bien puede darse el caso de que dos terminales utilicen las mismas etiquetas, esto es bastante poco probable, dado que el campo es ilimitado en tamaño, y permite utilizar cualquier tipo de carácter alfanumérico.

La “Hora”, es uno de los más útiles datos al momento de sincronizar la corrección con el terminal de referencia. Los campos “Longitud Corregida” y “Latitud Corregida” son los que almacenan las coordenadas a las cuales se les ha aplicado el método de corrección.

Luego de esto, se empezaron a realizar pruebas completas, aplicando la corrección del posicionamiento sobre el terminal móvil. En la siguiente imagen, se

puede observar una toma completa de la pantalla principal del programa encargado de procesar los datos.

Hora	Latitud GPS	Longitud GPS	Error de latitud	Error de Longitud	Distancia de correccion (mts)
2/10/2012 1:02:28 PM	10.50344676710665	-66.8722465820	-0.00001876710665	-0.00000641793895	2.20161806920315
2/10/2012 1:02:29 PM	10.50344676710665	-66.8722465820	-0.00001876710665	-0.00000641793895	2.20161806920315
2/10/2012 1:02:30 PM	10.50344676710665	-66.8722465820	-0.00001876710665	-0.00000641793895	2.20161806920315
2/10/2012 1:02:31 PM	10.50344676710665	-66.8722465820	-0.00001876710665	-0.00000641793895	2.20161806920315
2/10/2012 1:02:32 PM	10.50344676710665	-66.8722465820	-0.00001876710665	-0.00000641793895	2.20161806920315
2/10/2012 1:02:33 PM	10.50344676710665	-66.8722465820	-0.00001876710665	-0.00000641793895	2.20161806920315

Etiqueta	Hora	Latitud GPS	Longitud GPS	Latitud Corregida	Longitud Corregida	Margen de Correccion (mts)
jr	2/10/2012 1:03:06 PM	10.50338588093656	-66.87231754065442	10.503404648043215	-66.87231112271547	2.20161806920315
jr	2/10/2012 1:03:08 PM	10.50338588093656	-66.87231754065442	10.503404648043215	-66.87231112271547	2.20161806920315

Figura 13: Interfaz Gráfica. Procesador de Datos.

Extraído de: Realización propia.

En la parte superior se observa la tabla con los datos actualizados provenientes del terminal de referencia.

En la parte inferior, se observa la tabla con los datos provenientes del terminal móvil, y con la corrección ya aplicada. La última columna de esta tabla muestra el margen de corrección que se logró aplicar sobre esta actualización de posicionamiento.

En los campos que se encuentran en el medio, “Latitud real” y “Longitud real” se establecen las coordenadas reales de posicionamiento del terminal de referencias. A partir de estas se extrae el error, es por esta razón que estos dos campos tienen alta importancia en el funcionamiento del sistema.

El campo a la derecha de estos, llamado “File Path” es el directorio en el cual se almacenará el archivo que contiene los datos de corrección del terminal móvil. De no ser especificado ningún directorio antes de la ejecución del programa, este mostrará una ventana para hacerlo. Si únicamente se especifica un directorio, pero no un archivo, éste automáticamente creará un nuevo archivo con la información.

El botón rojo, con la etiqueta “Stop”, detiene la ejecución de éste programa.

Entrando en detalle de la corrección realizada en esta prueba, se puede notar el margen de corrección de la misma, igual a dos mts. Esta es la diferencia en metros que hay entre el punto geográfico donde el sistema G.P.S. dictó la posición y el punto donde realmente se encontraba el terminal móvil al momento de realizar el cálculo de posicionamiento.

En la figura que se muestra a continuación, se puede observar una imagen de mapa, con la posición G.P.S., y la posición verdadera del terminal móvil al que anteriormente se le aplicó la corrección. Esta figura es tomada a través de un API de “Google Maps”, que envía una imagen de mapa con indicadores puestos sobre las coordenadas que se pide graficar. Este programa es también parte de este Trabajo Especial de Grado.

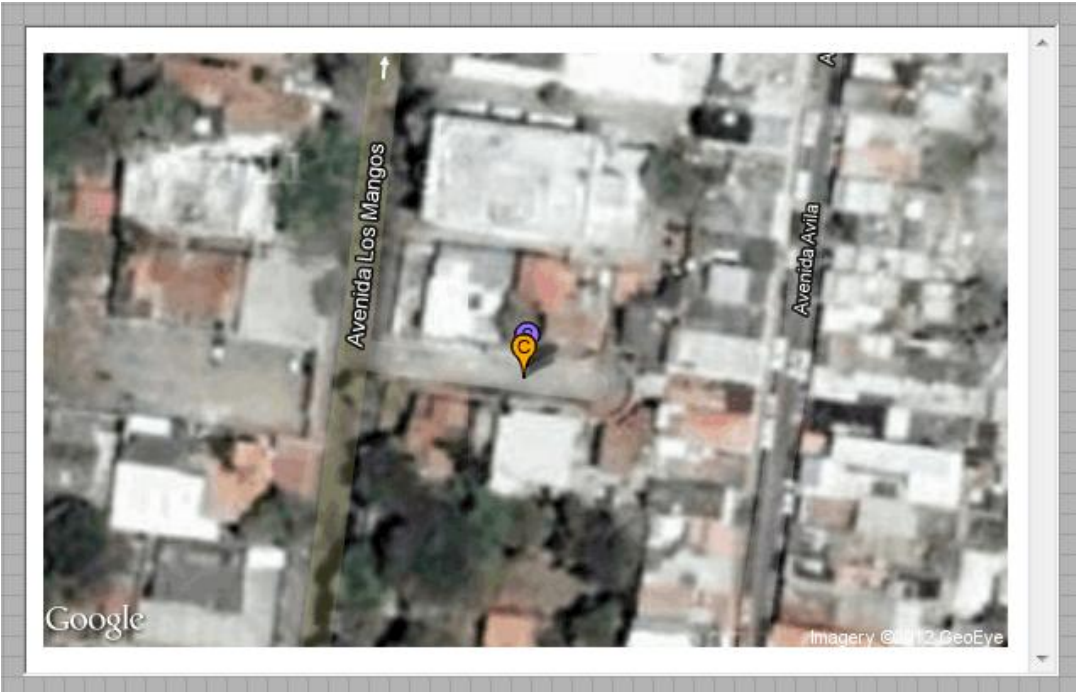


Figura 14: Corrección 1. Posición G.P.S. (Naranja). Posición Corregida (Morado).
Extraído de: Realización Propia.

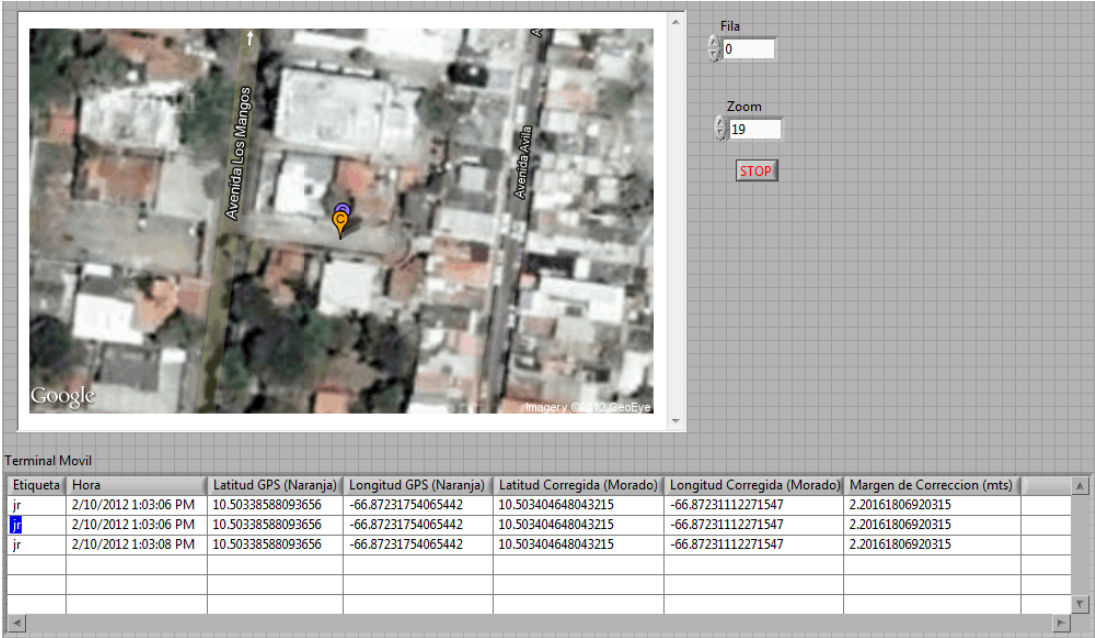


Figura 15: Interfaz Gráfica. Programa de Mapeo de Posiciones.
Extraído de: Realización Propia.

En la parte superior se puede observar la etiqueta de color naranja, que indica la posición real del terminal móvil, y la etiqueta de color morado, que muestra la posición G.P.S. de este. La diferencia que hay entre las etiquetas muestra claramente la corrección realizada.

En la parte superior derecha se muestra una casilla con la etiqueta “fila”, en la cual se puede seleccionar la corrección de posicionamiento que se quiera graficar, sea cual sea.

El campo variable llamado “Zoom” permite elegir el nivel de acercamiento con el cual se desea ver la imagen de mapa que se muestra.

El funcionamiento de este programa es el siguiente, una vez que se ejecuta, éste muestra una ventana de directorio donde se tiene que elegir el archivo de texto que contiene la información de posicionamiento que se desea graficar. Este archivo tiene un formato determinado, el cual es creado por el programa encargado del procesamiento de los datos de G.P.S.. Es por esta razón que es bastante importante conocer el directorio donde se almacenan estos archivos.

Hay que destacar la necesidad de contar con una conexión estable a internet en el momento de realizar el mapeo de las ubicaciones, ya que los mapas provienen de una aplicación Web.

La razón por la cual se decidió separar el programa de procesamiento de información y de mapeo de la misma es sencillamente permitir que el procesamiento de los datos sea mucho más rápido, y principalmente por la suposición de que durante los trabajos donde se aplique el sistema de corrección, probablemente no se cuente con una conexión estable a la red pública.

En la siguiente imagen, se muestra una prueba de corrección realizada en otro lugar de la ciudad y bajo diferentes condiciones climáticas. La anterior fue durante el

día, con el cielo totalmente despejado, la que se muestra seguidamente fue realizada de noche con condición de cielo nublado.



Figura 16: Corrección 2. Posición G.P.S. (Naranja). Posición Corregida (Morado).

Extraído de: Realización Propia.

Esta prueba del sistema, arrojó un margen de corrección aún mayor, en gran parte debido a la condición climática, que provocó que el error fuese también mayor. Ésta es la principal razón por la cual la corrección efectiva puede variar entre una prueba y otra, que las condiciones cambien y con esto el error de sistema también varíe. Implementando nuevamente la ecuación de medición de distancia entre coordenadas, se obtuvo que la corrección que se realizó en esta prueba fue de 3.79 metros.

Para establecer una conclusión precisa sobre el funcionamiento efectivo de este sistema construido, no son suficientes estas dos pruebas que se incluyen en los resultados del proyecto, es por esta razón, que otras experiencias realizadas se

incluyen al final de este trabajo en forma de apéndice. Estas únicamente se presentan como impresiones de pantalla del procesador de datos, sin un análisis específico sobre cada una.

Para cada una de las pruebas que se muestran al final del trabajo, y que se mencionan en el párrafo anterior, se consiguió una corrección de error promedio de aproximadamente 5.8 metros. Hay que destacar en este punto que los lugares donde se realizaron las pruebas fueron escogidos de manera estratégica para que fuesen lugares totalmente abiertos, que tuvieran la menor cantidad de obstáculos posibles para que las señales no se viesen afectadas de ninguna manera antes de ser recibidas por los terminales. Asimismo, estos lugares fueron escogidos también pensando en lograr una ubicación que fuese bastante fácil de visualizar en los mapas, y poder así obtener unas coordenadas reales bastante exactas.

También hay que resaltar entre los resultados obtenidos, que comparando las coordenadas reales de los terminales móviles, con las coordenadas corregidas de los mismos, de todas las 19 pruebas que se realizaron y se anexan al final del trabajo, sólo una de ellas presentó una diferencia mayor a un metro entre el punto real de ubicación y el punto de corrección obtenido. Es decir, la precisión que se logró obtener para las otras 18 pruebas fue menor a 1 metro entre el punto de ubicación verdadero y el punto de ubicación corregido.

Estas pruebas, con resultados iguales, y algunas veces superiores a los esperados en el momento del diseño del sistema, nos llevan a emitir conclusiones sobre el funcionamiento del proyecto.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

El sistema G.P.S., como sistema de ubicación y asistencia en desplazamiento, gracias a los mapas asistidos por coordenadas que han sido creados, ha significado una gran ayuda en muchos campos de trabajo que constituyen nuestra sociedad.

El propósito de realizar una corrección sobre este sistema significa una asistencia extra para trabajos que verdaderamente necesitan de este tipo de correcciones, y un nivel más alto de exactitud del que el sistema *per se* puede ofrecer. A partir de esto, se puede amplificar aun más el campo de uso del sistema G.P.S., y hacer de éste un sistema aun más popular.

Durante el desarrollo de este proyecto se ha notado como el deterioro de la señal gracias a distintos obstáculos que se pueden encontrar en la línea de vista entre los satélites y los receptores pueden causar un aumento considerable del error, como se ha establecido en estudios anteriores. En un estudio que se realizó como parte del proyecto se pudo notar la diferencia del error recibiendo la señal teniendo un techo de por medio y teniendo visión directa del cielo, el error aumentó de manera considerable.

Resulta de suma importancia destacar que el sistema desarrollado sólo corrige errores propios el sistema G.P.S. y no aquéllos originados por factores externos como lo son el *hardware*, las pérdidas, interferencias, entre otros. Hay tener en cuenta este factor a la hora de emplear este sistema.

Por lo antes mencionado, este sistema está orientado para ser usado en zonas abiertas, en donde se pueda garantizar la igualdad entre el error que afecta al terminal móvil y al terminal de referencia. Se recomienda entonces que al menos el terminal de referencia esté colocado en una zona abierta, de manera que tenga una medición

fidedigna del error propio de G.P.S., y sea éste el que se aplica como corrección en todos los demás terminales.

Se concluye también que el utilizar módulos G.P.S. menos precisos añade errores externos, que en muchos casos harían despreciable el error característico de G.P.S., haciendo fútil la acción de corrección. Utilícese terminales cuyo error sea el mínimo posible, especialmente para el terminal de referencia.

Este sistema utiliza correcciones diferenciales no selectivas, es decir, tiene una precisión limitada. Si se desea más exactitud, se sugiere implementar algoritmos de corrección selectiva.

Esto nunca se vio como una limitante en este proyecto, ya que las correcciones selectivas son en las cuales los terminales móviles y/o la estación de referencias pueden elegir a partir de que señales satelitales extraer la información de ubicación. Estos sistemas selectivos son empleados únicamente en redes amplias de corrección diferencial, en las que existe la posibilidad de que el terminal de referencias y los terminales móviles no estén captando la señal de los mismos satélites.

En el sistema planteado e implementado, debido al uso de una red inalámbrica por tecnología Wi-Fi, donde las distancias de cobertura, distancias máximas posibles entre el terminal de referencias y los terminales móviles serán menores a 100 metros, y en los mejores casos de cobertura, en topologías de red de puntos de acceso inalámbricos seguirán siendo menores a un kilómetro, la posibilidad de que los terminales móviles no capten los mismos satélites que el terminal de referencias es bastante baja. De cualquier manera, una situación de esta índole únicamente provoca que el error no sea del todo corregido.

Así como se menciona anteriormente, el alcance del sistema depende del medio que se utilice para transportar los datos desde el terminal móvil hasta el procesador de datos, en este caso Wi-Fi. La utilización de otro método que permita

aumentar la separación entre los terminales y el corrector de errores, incrementaría la utilidad de este sistema. Para esto se recomienda como opción utilizar la red GSM como medio de transporte para la información, o cualquier otro método alternativo que cumpla la finalidad deseada.

Está claro de igual forma, que la recomendación para futuros trabajos sobre este proyecto, de aumentar el rango de cobertura del sistema a través de la red GSM de alguna operadora de telefonía móvil, va de la mano con el desarrollo del código para disponer de selectividad, y así evitar el deterioro de la corrección diferencial.

En cuanto al desarrollo de los distintos programas que componen este sistema de corrección se ha hecho notar la ventaja que tiene utilizar un lenguaje de programación altamente usado, debido a la cantidad de referencias y documentación que se puede conseguir de estos. Esto se puede tomar en este proyecto como un gran acierto, el hecho de haber seleccionado un lenguaje de programación abierto y popular como lo es Android (basado en JAVA) ha hecho que conseguir la información necesaria para escribir el código haya resultado una tarea menos complicada de lo que parecía.

Como recomendaciones finales para futuros proyectos, se tiene el extender el proyecto para la posibilidad de corregir errores de sistemas que se encuentren en movimiento, lo cual involucra muchas consideraciones que no se tienen presentes en proyecto.

El sistema también depende de disponer una conexión a Internet para la representación gráfica de las correcciones en mapas, se sugiera buscar un método para prescindir de ésta conexión, para de esta manera incrementar la movilidad del sistema.

Referencias Bibliográficas

Abdi, A. H. (2011). Mobile Ad Hoc Network (MANET). Retrieved Julio 3, 2011, from Abdirashid Hassan Abdi: <http://rashka17.blogspot.com/2011/05/mobile-ad-hoc-network-manet.html>

Authority, S. R. (2003). DGPS Guidance for Helicopter Approaches to Offshore Platforms. West Sussex: Civil Aviation Authority.

Automata., U. d. (1999). Fuentes de Error en GPS. Valladolid, Castilla y Leon, Spain.

Betke, K. (2000). The NMEA 0183 Protocol.

Chivers, M. (n.d.). Differential GPS Explained. Trimble Navigation Limited .

Correia, P. (2000). Guia Practica del GPS. Paris: Editions Eyrolles.

FRED, L. L. (2002). Differential Solutions Using Long-Range, Dual-Frequency GPS Correction Data. Monterey: NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL. UNITED STATES NAVY.

Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. (2001). Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integreation. New York: John Wiley & Sons Inc.

Groves, P. D. (2008). Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Boston: Artech House.

Hennerström, D. (2005). Increasing GPS accuracy for low cost receivers. Lulea: Lulea University of Technology.

Hsiao, F.-B., Huang, S.-H., & Lee, M.-T. (2003). The study of real-timed GPS navigation accuracy during approach and landing of an ultralight vehicle. Recent Advances in Space Technologies , 375.

Labiod, H., Afifi, H., & De Santis, C. (2007). Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee and WiMax. Ecuador: Escuela Politecnica del Ejercito.

Palmerini, G. B., & Sabatini, R. (2008). Differential Global Positioning System (DGPS) for flight testing. Neuilly-sur-Seine Cedex: The Research and Technology Organisation of NATO.

Parziale, L., Britt, D. T., Davis, C., Forrester, J., Liu, W., Matthews, C., et al. (2006). TCP/IP Tutorial and Technical Overview. Poughkeepsie: IBM/Redbooks.

Seeber, G. (2003). Satellite Geodesy. New York: Walter de Gruyter.

Solares, R. A. (2002). El Sistema de Posicionamiento Global GPS y su aplicación a la navegación aérea. Ciudad de Guatemala: Universidad Francisco Marroquin.

Warren, D. L. (2002). Broadcast Vs. Precise GPS Ephemerides: A Historical Perspective. Ohio: AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

Xu, G. (2007). GPS. Theory, Algorithms and Applications. 2nd. Edition. Berlin.: Springer-Verlag.

Apéndice A

Pruebas adicionales sobre el sistema

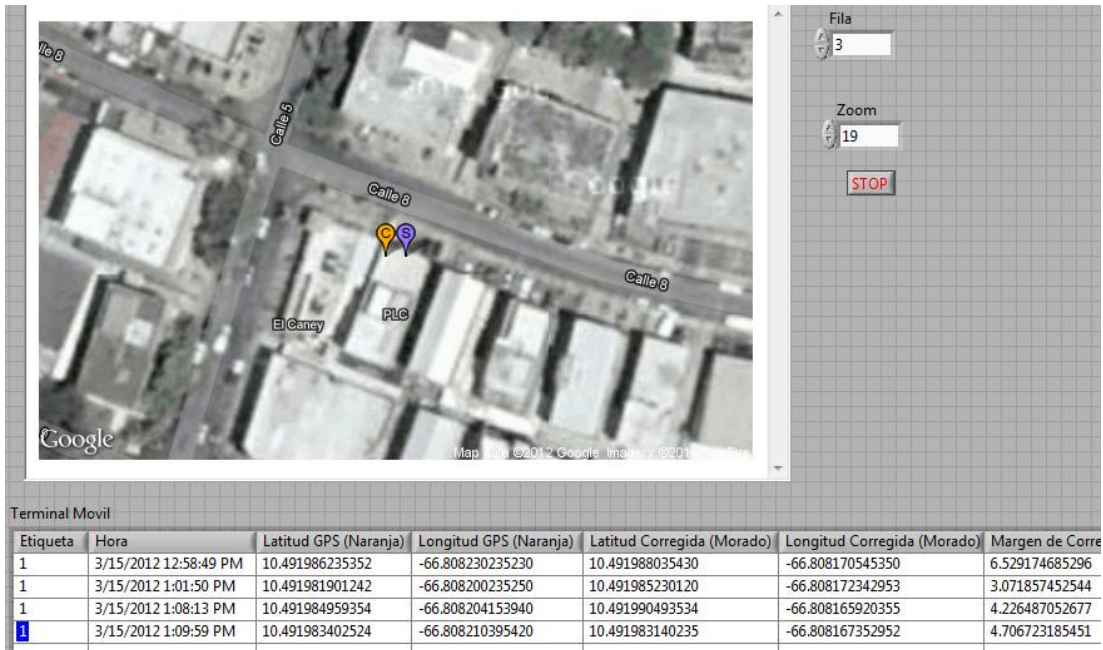


Figura 17: Primera prueba. Coordenadas reales: 10.491982, -66.808172.

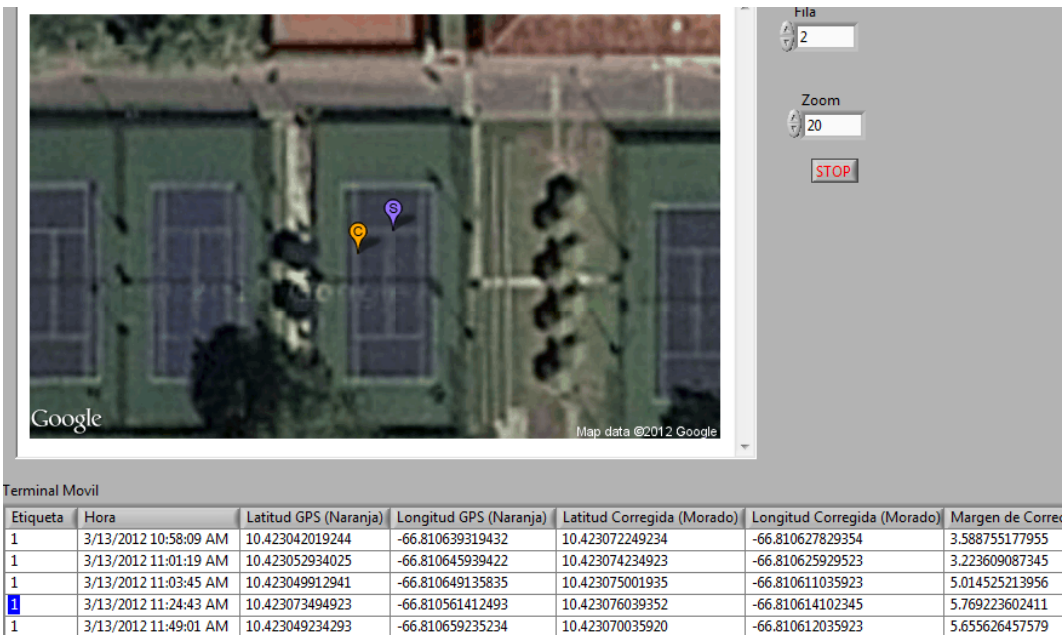


Figura 18: Segunda prueba. Coordenadas reales: 10.423073, -66.810619.

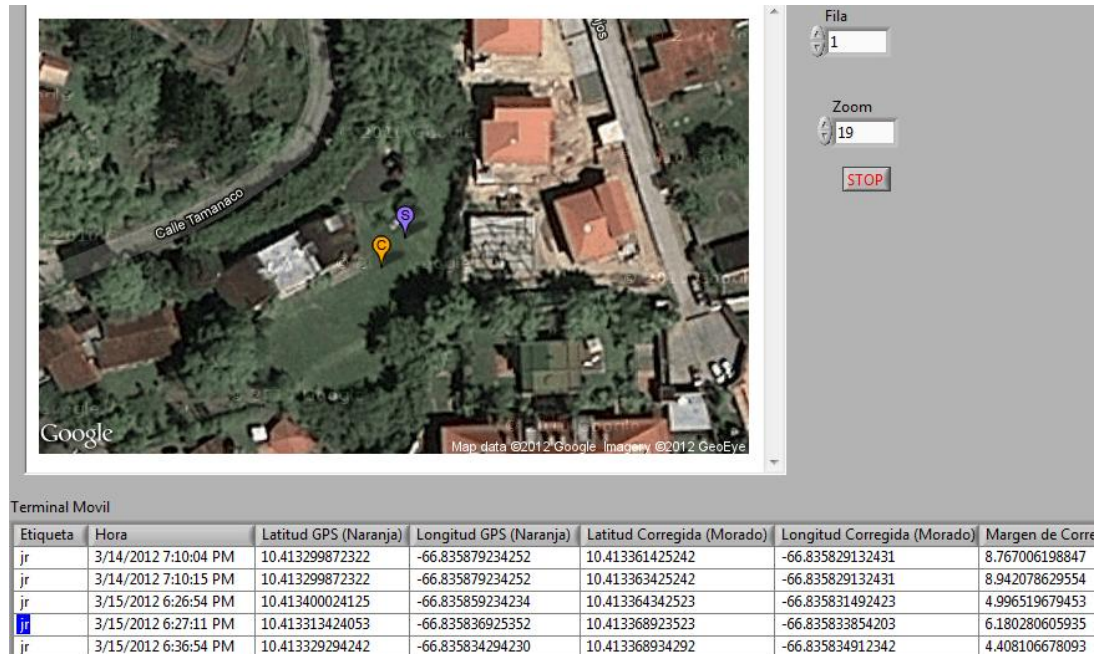


Figura 19: Tercera prueba. Coordenadas reales: 10.413368, -66.835831.

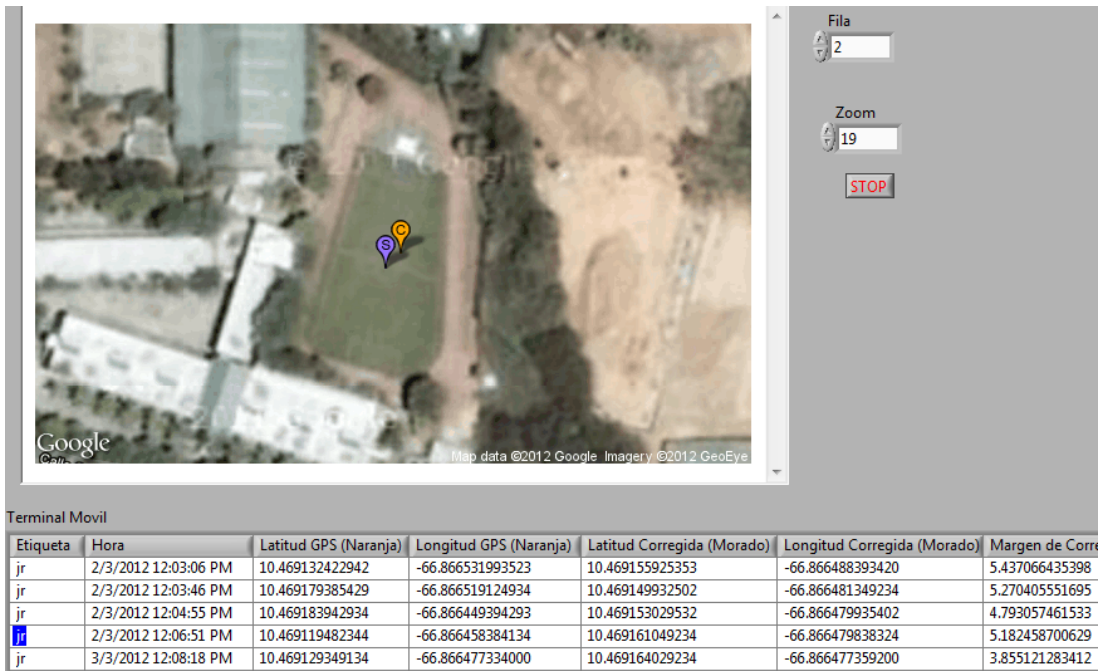


Figura 20: Cuarta prueba. Coordenadas reales: 10.469157, -66.866481.