



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

## **SISTEMA DE LOCALIZACION DE PERSONAS Y RECURSOS PARA RECINTOS CERRADOS, BASADO EN WI-FI**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL EN COMPUTACIÓN**

**RODRIGO FELIPE VERA BARRERA**

**PROFESOR GUÍA:  
SERGIO OCHOA DELORENZI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALEJANDRO HEVIA ANGULO  
NELSON ANTRANIG BALOIAN TATARYAN**

**SANTIAGO DE CHILE  
ENERO 2010**

## **Agradecimientos**

Quisiera dedicar la finalización de este trabajo a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este proceso, con palabras de ánimo y consejos, sin las cuales no hubiese podido lograr este objetivo.

Al profesor Sergio Ochoa, por su rigurosidad, carácter y respeto, que han sido pieza clave de este trabajo novedoso, el cual forjó y sentó bases sólidas en el conocimiento en el área en la que me desarrollaré profesionalmente a futuro.

A mi familia y compañeros de carrera, lo cuales me escucharon y animaron, apoyándome en todo momento.

A Sara, por ir de mi mano en las etapas más importantes de mi vida. Por darme la fuerza para seguir adelante y estar siempre a mi lado.

Finalmente, este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto Fondecyt (Chile), N° 11060467 y por el proyecto LACCIR No. R0308LAC005.

## Resumen

A partir del surgimiento de la computación móvil, la necesidad de conocer la ubicación de recursos y/o personas ha sido imperante en el desarrollo de nuevas tecnologías que persiguen estos objetivos. En particular, los sistemas de localización en tiempo real cobran cada día más importancia. Típicamente, este tipo de sistemas persiguen fines de seguridad, optimización y administración. Rubros de todas las áreas aprovechan cada vez más las ventajas de estas tecnologías y las incorporan en su plan de negocios. Desde el seguimiento de activos dentro de un recinto cerrado, hasta el control de flota en empresas de transporte, son aplicaciones conocidas de este tipo de soluciones.

El presente trabajo consiste en diseñar e implementar una aplicación de software que funcione en un dispositivo móvil. Que permita estimar la posición del usuario de dicho dispositivo móvil dentro de un recinto cerrado con un margen de error que ayude a tomar decisiones a un ser humano. La información necesaria para realizar la estimación se obtiene del contraste entre un modelo del espacio cargado en memoria y las señales inalámbricas observadas. Se requiere que el entorno en el cual se desea implantar posea distintos puntos de accesos WiFi para usar como referencia. La aplicación desarrollada permite construir de manera expedita y con la mínima información un modelo del decaimiento de las señales WiFi para toda la zona objetivo. La solución implementada se adapta fácilmente ante cambios en las referencias del recinto y permite que un mismo modelo funcione en distintos dispositivos con un leve cambio en la configuración. La calidad de la estimación es proporcional a la densidad de señales WiFi del ambiente. En su estado actual, en un ambiente de densidad moderada, se pueden obtener márgenes de error aceptables para que un humano pueda encontrar con inspección visual a otra persona cuya posición ha sido estimada por la aplicación.

## Tabla de contenido

Resumen .....	3
Tabla de contenido .....	4
1. Introducción.....	5
1.1. Motivación.....	6
1.2. Objetivos de la Memoria .....	8
2. Revisión Bibliográfica .....	9
3. Fuentes de Datos para la Localización.....	11
3.1. WiFi.....	12
3.1.1. Experimento para la determinación de la curva de decaimiento ..	13
3.2. Sensores de Movimiento .....	21
4. Solución Propuesta .....	22
4.1. Pre-proceso .....	23
4.2. Ciclo Principal .....	25
4.4. Análisis y Comparación de la Solución Propuesta .....	27
5. Implementación de la Solución.....	29
5.1 Plataforma Objetivo .....	29
5.2 Bibliotecas Utilizadas .....	30
5.2.1. OpenNETCF .....	30
6. Resultados .....	34
6.1 Primeros resultados .....	35
6.2 Prueba con un segundo dispositivo .....	36
6.3 Parche de puntos muertos.....	37
7. Conclusiones y Trabajo a Futuro.....	38
8. Bibliografía y Referencias.....	41
Anexo A: Tablas de valores asociados a las figuras 5 y 6. ....	44

## 1. Introducción

A partir del surgimiento de la computación móvil, la necesidad de conocer la ubicación de recursos y/o personas ha sido imperante en el desarrollo de nuevas tecnologías que persiguen estos objetivos. En particular, los sistemas de localización en tiempo real cobran cada día más importancia. Típicamente, este tipo de sistemas persiguen fines de seguridad, optimización y administración. Rubros de todas las áreas aprovechan cada vez más las ventajas de estas tecnologías y las incorporan en su plan de negocios. Desde el seguimiento de activos dentro de un recinto cerrado, hasta el control de flota en empresas de transporte, son aplicaciones conocidas de este tipo de soluciones. La ciencia de la computación no puede estar ajena a esta realidad, y es así como en los últimos años se puede apreciar un renacimiento en el interés por desarrollar sistemas que saquen provecho a estas cualidades. Nacen nuevas aplicaciones destinadas a aportar servicios basados en la posición del usuario [Cai08], las cuales por ejemplo, listan locales de interés en la vecindad, envían publicidad localizada/personalizada o simplemente permiten el acceso a un mapa de la zona actual [Gmm09] [Sky09].

La tecnología GPS suele ser la más popular en este ámbito, para lograr determinar la posición de un usuario o recurso. Sin embargo, esta tecnología está severamente restringida por el costo adicional de un receptor GPS, y por la infraestructura satelital requerida para su correcto funcionamiento. Dado esto, la noción de un sistema de localización que utilice la infraestructura ya existente ha tomado especial fuerza. Se aprecia un especial interés por investigar la factibilidad de utilizar puntos de referencias fijos, como antenas de telefonía celular o algunas referencias más móviles (puntos de acceso bluetooth o WiFi) a la hora de estimar la posición. Sin embargo, estas tecnologías están diseñadas para funcionar a un nivel macro en ambientes exteriores, con márgenes de error por lo general de decenas de metros.

Este trabajo de memoria busca desarrollar un sistema de localización en tiempo real, que permita funcionar de manera adecuada en recintos cerrados (donde el GPS no funciona). El desarrollo de este sistema estará enfocado en dispositivos móviles, los cuales deberán ser capaces de determinar su propia posición en forma autónoma, sin la

necesidad de conectarse a un sistema de control central.

## **1.1. Motivación**

El desarrollo de un sistema de localización en tiempo real, basado en GPS o WiFi, no es nada nuevo. Estos sistemas existen en la actualidad y se ocupan en muchas de las aplicaciones comerciales vigentes. Sin embargo, las técnicas ocupadas actualmente no son útiles cuando se intentan aplicar en recintos cerrados, debido a que los mecanismos de geo-referenciación por lo general no funcionan, o tienen rangos de error muy altos. Particularmente, los sistemas basados en dispositivos GPS no funcionan de manera adecuada en interiores, la comunicación con los satélites se ve considerablemente mermada provocando tres grandes problemas que hacen inviable este tipo de solución.

El primero de estos problemas es el error asociado a la latitud y longitud. Este es el menor de los errores, ya que si se encuentra dentro de un rango aceptable y acotado, puede asumirse como parte de la incertidumbre manejable por la solución. El segundo problema es el error vertical asociado. Este error, incluso en condiciones de cielo despejado, es demasiado grande para los propósitos deseados. Dentro de un recinto cerrado, este error podría indicar que una persona se encuentra en un cierto piso, cuando en realidad se encuentra en otro. La diferencia de estar en un piso o en otro es vital, y por ende es un error que no se puede ignorar. Finalmente, se tiene el error de la intermitencia del servicio. Aquí no sólo se ve menguado en el interior de los establecimientos normales, sino se ve totalmente inutilizado cuando se trabaja bajo tierra, por ejemplo en un estacionamiento o las instalaciones de un sistema de transporte subterráneo.

Los sistemas de localización actuales, basados en WiFi, presentan variadas implementaciones. Por lo general todos caen en una de las siguientes categorías:

Análisis de una señal. Los sistemas más comunes sólo analizan la presencia o ausencia de una señal WiFi, sin importar la potencia de su señal [Sky09] [Her08].

Esto entrega un enorme grado de error, y además la comparación se realiza en un servidor externo al dispositivo. Por lo tanto, se asume una confianza ciega, por parte del usuario, con respecto a la información almacenada en una base de datos que él no puede modificar (lo cual es una alternativa razonable para exteriores, pero no es el caso que interesa).

Sistema de triangulación. Estos sistemas emplean un algoritmo más complejo de triangulación, el cual mejora el resultado [Pla06]. Sin embargo, debido a la fluctuante arquitectura de los recintos, una simple triangulación no es suficiente ya que la degradación de la señal no es lineal y los distintos obstáculos estructurales hacen este proceso aún más difícil. Por lo tanto, un simple mapa del recinto con los Access Point no es suficiente.

Sistemas ad-hoc. Finalmente, hay soluciones más complejas, las cuales entregan un buen resultado en interiores, pero suelen depender de hardware especial (ad-hoc) para funcionar adecuadamente [Eka09] y el problema que resuelven suele ser distinto (seguimiento de recursos estáticos dentro de un recinto, cantidad de gente que pasa por un punto en particular, etc.). Este tipo de soluciones puede involucrar un sistema de monitoreo central, que es quien detecta y ubica a los dispositivos marcados. En este caso, usualmente los mismos dispositivos, no son conscientes de su propia ubicación. La otra opción de los sistemas ad-hoc es realizar un proceso de mapeado de las señales, en un gran número de puntos distintos del recinto, con una alta cantidad de muestras por punto [Wil09] [You05]. Esto involucra una gran inversión de tiempo en la etapa inicial y requiere que la infraestructura de redes WiFi de un recinto no varíe en el tiempo. Con este mapa de señales, es el mismo dispositivo quien debe detectar y ser consciente de su ubicación.

Este último escenario es el ámbito en el que se enmarca la memoria. De ahí nace la complejidad del problema, el interés por su estudio y el constante interés por proponer modelos que resuelven este paradigma, minimizando su error [Cai08] [Lad02] [You05]. Adicionalmente, se desea investigar cómo las nuevas tecnologías de sensores de

movimiento incorporadas por los dispositivos más nuevos, pueden ayudar a mejorar los resultados. Ya sea mejorando la precisión en las predicciones o disminuyendo el tiempo de inversión en la etapa de configuración inicial. Los dispositivos actuales suelen incorporar de manera integrada algún tipo de acelerómetro, giroscopio o brújula digital.

Se pretende que la solución que se encuentre, sea aplicada a escenarios de salud (hospitales) y de inspecciones de obra (proyectos de construcción). Por supuesto, existen muchos otros ámbitos en los cuales se podría utilizar la potencial solución al problema propuesto, como por ejemplo: educación (trabajos de investigación de campo), seguridad (operativos policiales), y procesos productivos (tracking de recursos en una fábrica).

## **1.2. Objetivos de la Memoria**

El objetivo general de esta memoria es diseñar e implementar una herramienta, que utilizando los puntos de acceso y otras señales WiFi, sea capaz de detectar la posición del usuario, a través de su equipo móvil, en el interior de un recinto, de manera independiente de un servidor central. Para ello se utilizará únicamente la infraestructura de comunicaciones disponible (aunque no se descarta la opción de añadir elementos intermedios, si es crucial mejorar el nivel de precisión del software). La solución buscada debe poder ejecutarse en una amplia lista de dispositivos computacionales móviles, en particular teléfonos celulares.

Del objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos a desarrollar durante la memoria:

1. Diseñar un algoritmo capaz de discernir la posición actual del usuario, comparando la información actual (medida a través de la antena WiFi) con una base de datos de señales pre-cargada en la memoria.
2. Implementar este algoritmo para que funcione en un dispositivo móvil.
3. Adicionalmente es deseable definir e implementar, para un dispositivo móvil, un método compatible con la solución propuesta que permita crear y adiestrar la

base de datos usada como referencia.

4. Utilizar los sensores de movimiento para mejorar el resultado de la predicción.

## **2. Revisión Bibliográfica**

El área de investigación relacionada con la localización en tiempo real en recintos cerrados, utilizando dispositivos móviles, se encuentra fuertemente documentada. Se pueden encontrar publicaciones con resultados exitosos que datan desde hace casi diez años [Bah00], que luego fueron evolucionando en el tiempo, en pos de buscar refinar la técnica y mejorar los resultados obtenidos [You05] [Cas08] [Lad02]. También hay implementaciones de prototipos específicos para localización en estos ambientes [Ald04, Cai08, Cas08].

Llevados a la práctica, hoy día no sólo existen numerosos sistemas comerciales disponibles, sino que aún se busca la manera de mejorar el error, disminuir el tiempo de implantación e incluso ver el impacto de estos sistemas en el personal [Gui08]. A continuación se presentan con más detalles algunos de los trabajos más relevantes junto con sus aportes al área.

RADAR [Bah00] es uno de las referencias más antiguas de localización dentro de edificios utilizando radio frecuencias. Utiliza múltiples muestras tomadas en distintos puntos y a partir de ello triangula la posición del usuario. Algunos de los resultados más interesantes de su desarrollo son: (1) el modelo de la propagación de onda y (2) el análisis empírico de cómo diversos factores influyen en la medición y predicción. Factores como el número de puntos de medición y de muestras, e incluso la orientación del usuario. El error promedio en la predicción de posición con el sistema RADAR es de 2 a 3 metros.

El sistema Horus [You05] es la evolución natural del área e intenta disminuir el error asociado a cada predicción. A diferencia de RADAR, Horus utiliza un sistema probabilístico y no determinístico para estimar la posición, para ello plantea un modelo matemático asociado. Según el estudio realizado en [You04] los sistemas probabilísticos entregan mejores resultados que los determinísticos. De igual manera

que el sistema RADAR, está compuesto de una fase off-line (recolección de muestras y con su posición en el espacio) y online (uso de la aplicación). Según su experiencia empírica, el hecho de tener diferente hardware (distinto proveedor) no afecta mayormente la precisión de las mediciones en la etapa de entrenamiento. Sin embargo, si existe diferencia entre ciertas tarjetas inalámbricas de distintas marcas en la etapa de ejecución. El error promedio de la predicción en la posición es de 40 a 50 centímetros.

Otro desarrollo interesante es el llevado a cabo por Castro y Favela [Cas08], el cual repasa en las implicaciones de una implementación en un caso de uso real en un hospital. Los autores registran que los movimientos rápidos de un usuario pueden afectar la inferencia de posición, por lo que plantean una implementación que reduce la incerteza a través de redes neuronales. En movimiento continuo, el error estimado promedio se encuentra entre 2 a 4 metros.

Existen implementaciones disponibles de soluciones, ya sea para espacios abiertos [Sky09] [Pla06] [Her08] [Gmm09], como para recintos cerrados [Eka09]. El sistema para exteriores Skyhook [Sky09] es utilizado en la actualidad como el motor de localización del iPhone. Sin embargo, al igual que el resto de sistemas de geo-localización para espacios abiertos, no puede ser aplicado en recintos cerrados.

El sistema Ekahau [Eka09] es una solución comercial para interiores que puede funcionar sin hardware adicional utilizando sólo la infraestructura disponible y lograr un error promedio desde 1.5 a 3 metros. Adicionalmente, este error se puede disminuir a menos de medio metro con la ayuda de tags WiFi, emisores de señal que permiten tener más puntos de referencia en las ubicaciones críticas.

Para el propósito del sistema a desarrollar, un error estimado de 2 a 4 metros se puede considerar aceptable pues se encuentra dentro del rango de visión entre dos personas, probablemente en la misma habitación. En general todos estos sistemas tienen un trade-off intrínseco entre la precisión necesaria y el costo de adquirirla, ya sea en tiempo de entrenamiento o en costo de equipos adicionales.

Aparentemente existe una fuerte limitación en lo que respecta a lo que se puede llegar a hacer con la tecnología WiFi, los mejores resultados actuales parecen haberse estancado (errores menor a 1 m.) con una fuente de datos tan inestable como la intensidad WiFi. Sería ideal entonces encontrar otras tecnologías de apoyo, que ayuden a mejorar la precisión y disminuir, en la medida de lo posible, el costo de implantación del sistema. Los nuevos dispositivos móviles están incluyendo distintos sensores de movimiento integrados en su sistema. Existe en la literatura distintas aplicaciones que pueden ayudar a predecir la posición basándose en las funcionalidades adicionales que estos sensores proveen. Estos sensores suelen ser, por lo general, algún tipo de acelerómetro, giroscopio o una brújula digital.

El sistema COMPASS [Kin06] utiliza el compás digital del dispositivo móvil para discernir el subconjunto de datos de entrenamiento, con el cual se determinará la posición. Existen implementaciones de podómetros basados en el acelerómetro del dispositivo [Lsp09] [Wnp09] los cuales son capaces de identificar, con relativa eficiencia, cada vez que un usuario da un paso. De por sí, éste ya es suficiente apoyo para poder identificar si el usuario está en movimiento o no. Sin embargo, mezclado con una brújula estos componentes permitirían además identificar la dirección de los pasos.

Otras implementaciones son más complejas y no se limitan a sólo contar los pasos, sino que utilizan el acelerómetro del dispositivo para calcular las distancias recorridas. Estas toman muestras consecutivas de la aceleración a una alta tasa de actualización, realizando una doble integración de estos datos para obtener el vector de la distancia recorrida y el error asociado [Jac06] [Pfs08]. Incluso los mismos fabricantes de sensores de movimientos proveen documentos guías acerca de cómo implementar la lógica relacionada con este procedimiento [Sei07]. Aun así, la literatura disponible es escasa y es tema de estudio mejorar su implementación y reducir el error asociado.

### **3. Fuentes de Datos para la Localización**

Los dispositivos móviles se encuentran en una constante evolución, hoy en día ya no es posible divisar claramente la diferencia entre un GPS, un organizador personal y un

teléfono móvil. Con cada nuevo modelo se introducen nuevas funcionalidades que pueden aportar nuevos datos acerca del dispositivo y el ambiente en el cual se encuentra permitiendo, potencialmente, mejorar el proceso de estimación de posición del usuario. En particular, algunas de las funcionalidades más comunes hoy en día son:

- Conexión a una red de telefonía móvil
- Conexión a redes WiFi locales
- Colectividad Bluetooth
- Sistema de localización GPS
- Sensores de movimiento

Si bien la primera intuición sería pensar que un sistema de posicionamiento global es la primera herramienta que se debiese utilizar para resolver el problema, esta no resulta factible. La revisión bibliográfica muestra que en la práctica utilizar la antena GPS no es una opción viable debido a sus requerimientos intrínsecos de tener la mínima interferencia entre el dispositivo y los satélites, no permitiendo ser aplicable a recintos interiores. La revisión bibliográfica muestra también que la utilización de las redes de telefonía móvil para triangular la posición entre antenas tiene un rango de error demasiado grande para ser viable [Pla06] lo cual deja solo tres opciones de fuentes de datos para ser estudiadas.

### **3.1. WiFi**

La capacidad de detectar las redes WiFi cercanas es sin duda la opción más explotada en la mayoría de los sistemas de localización debido a sus múltiples beneficios. Es común que la mayoría de los recintos posean múltiples puntos de acceso WiFi, los cuales son fácilmente distinguibles entre sí, tienen un buen rango de alcance, entregan suficiente información acerca de ellos como para ser útiles y su implementación suele ser relativamente económica. Su utilidad no se pone en duda y por ello constituye la principal fuente de datos para la estimación de posición que se utilizó en esta memoria. Los principales problemas que presenta el utilizar las redes WiFi son la alta variabilidad de los datos entregados y lo fácil que es interferir con la señal.

Para la detección de posición se utiliza el método más ampliamente aceptado que consiste en estimar la distancia a la fuente en base a la intensidad de señal. Sin embargo, este estimador varía fácilmente dependiendo del hardware utilizado, dado esto se decidió realizar algunos experimentos para determinar los límites prácticos del hardware. El ambiente en el cual se realizaron los experimentos consiste en el patio de un edificio residencial. Este no presenta obstáculos físicos, siempre hay una línea de visión despejada entre el dispositivo y la fuente emisora de señal. El hardware ocupado consiste en un dispositivo móvil HTC Diamond Touch [Htc09] y un punto de acceso Belkin modelo F5D7230 [Bel09]. Las distancias a las cuales se decidió medir la intensidad de señal son 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 metros respectivamente.

En cada punto de medición se tomaron múltiples muestras de la intensidad de señal. La primera de ellas consiste en la intensidad actual que es simplemente la intensidad en el momento del muestreo, estas mediciones se ocupan para modelar el decaimiento de la señal WiFi. Debido a la alta fluctuación de la señal también se optó por tomar otras dos muestras adicionales y comparar su comportamiento con el de la señal instantánea. Estas dos muestras consisten en el promedio de las últimas  $n$  intensidades y el promedio ponderado de las últimas  $n$  intensidades. Esta última pondera con un mayor peso las mediciones más recientes con respecto a las pasadas. El número de repeticiones para cada punto oscila entre 15 y 30.

### **3.1.1. Experimento para la determinación de la curva de decaimiento**

El experimento más importante realizado consiste en determinar la cota práctica superior del comportamiento de la curva de la señal. Esto consiste en estudiar el decaimiento de la intensidad de señal a intervalos de distancia determinados en un ambiente tan libre de interferencia como sea posible. En base a este estudio se plantea un modelo de la curva de decaimiento y se generaliza como esta curva se puede ajustarse a distinto hardware a través de las constantes características  $K$  y  $M$  de cada hardware las cuales se describirán en detalle más adelante.

Lo primero en evaluar es la ver el comportamiento de la medición de la señal instantánea, esto se puede apreciar en la Figura 1, donde la intensidad de la señal presenta una tendencia a decaer con respecto a la distancia tal como es de esperar.

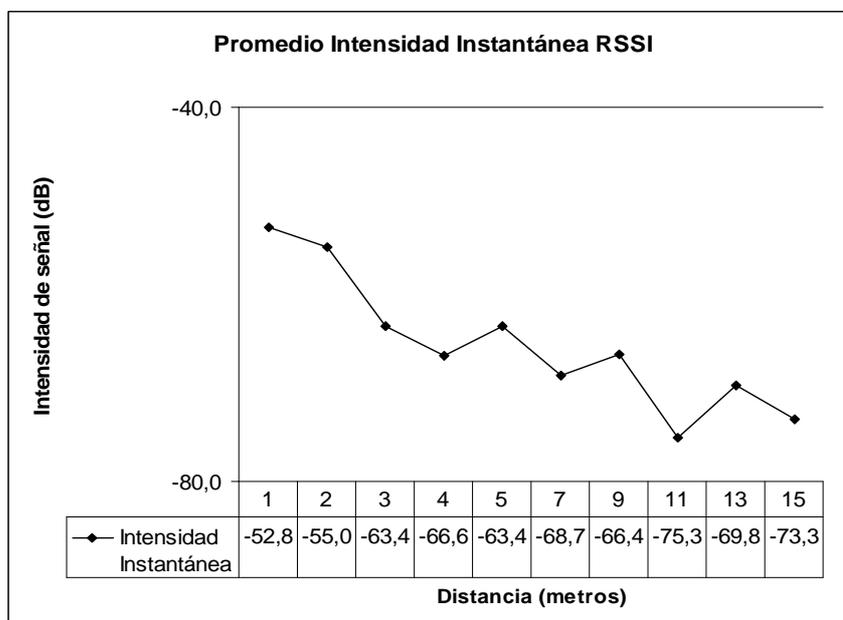


Figura 1 – Promedio de las intensidades instantáneas a distintas distancias

El verdadero punto a considerar es la desviación estándar de la intensidad, la cual se puede apreciar en la Figura 2 esta se mueve entre los rangos de 2,7 y 4,8 puntos, en promedio tiene un valor de 3,5 puntos. Si se aplica una regresión logarítmica se obtiene el modelo presentado en la Figura 3, el cual presenta un coeficiente de determinación de 0,86, lo cual es aceptable para una muestra con tanta varianza.

Interpolando la regresión para el resto de los puntos se obtiene el modelo de decaimiento de señal propuesto en la Figura 4. Este el modelo propuesto de decaimiento de señal para un caso óptimo en el cual existe la mínima interferencia posible entre el dispositivo y la fuente emisora de señal. Es la cota superior del comportamiento esperado de la curva, se espera que en un ambiente con más interferencia este decaimiento sea distinto.

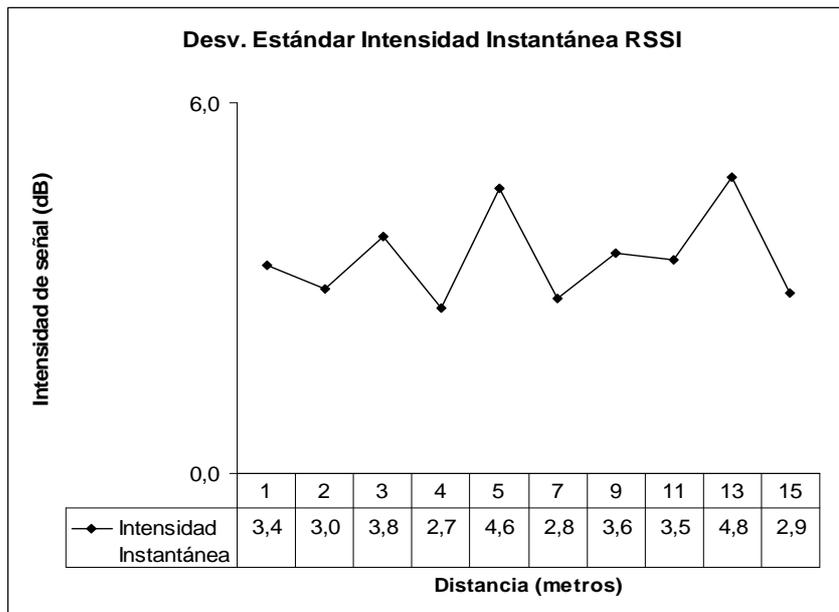


Figura 2 – Desviación estándar de las intensidades instantáneas a distintas distancias

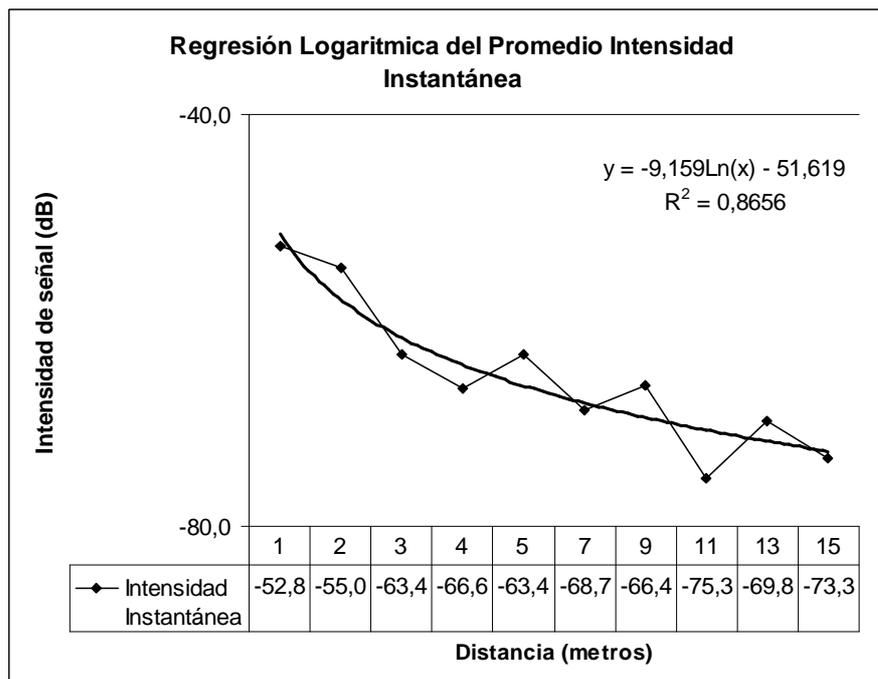


Figura 3 – Superposición del modelo obtenido en la regresión logarítmica y los promedios de las intensidades instantáneas

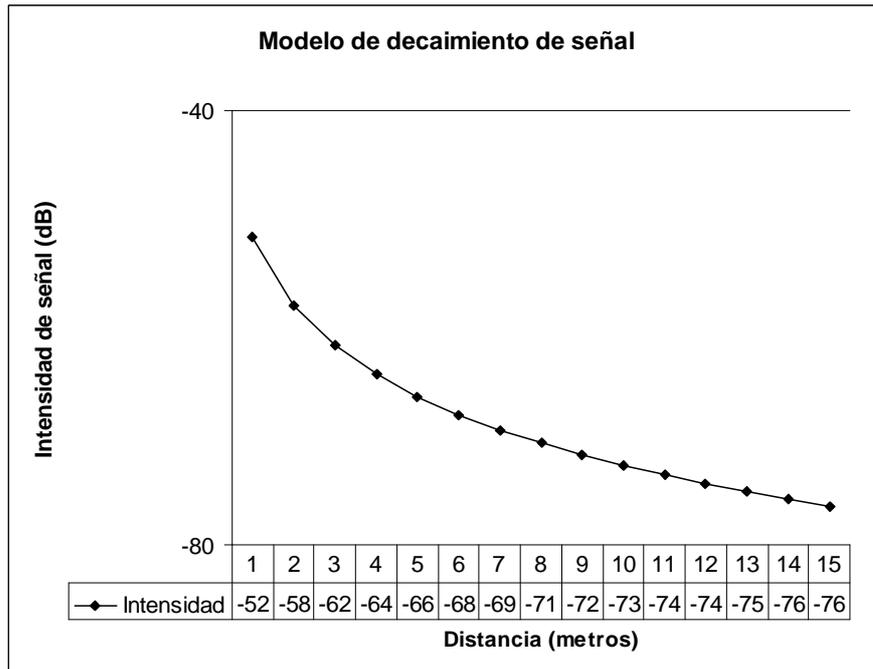


Figura 4 – Modelo obtenido de la regresión logarítmica y sus valores a distintas distancias

Hay que tomar en consideración que la intensidad de señal es totalmente dependiente del hardware. Es de esperar que para un punto de acceso con una antena de mayor potencia el decaimiento sea más lento pero la curva siga el mismo comportamiento. Esto se modela multiplicando el modelo por una constante K característica de cada fuente de emisión y una constante M característica de cada modelo receptor. Por simplicidad se utiliza K y M igual a 1,0 en caso de no indicar lo contrario.

La señal S esperada que debiese observar el dispositivo M a una distancia de X metros de la fuente K queda expresada como:

$$S = K \times M \times -(51,62 + 9,16 \ln(X))$$

De esta manera se obtiene el modelo de la cota superior del comportamiento de la curva en condiciones óptimas, permitiendo ajustarla a las distintas variedades de hardware disponible. Un ambiente con mucha interferencia o con una antena muy débil puede ser modelado por una constante  $K < 1,0$ . Así mismo, un dispositivo con una antena de recepción más potente puede ser modelado con una constante  $M > 1,0$ . Un

ambiente con demasiada interferencia probablemente no pueda ser modelado con esta curva ya que presente caídas más erráticas y abruptas que no son compatibles con el modelo.

### **3.1.2. Experimento para suavizar la estimación de señal**

El principal problema de utilizar directamente la señal observada es la alta desviación estándar observada. Debido a esto, no resulta posible utilizar directamente la intensidad instantánea como un estimador. Se estudió el comportamiento de dos alternativas: el promedio de las últimas  $n$  señales y el promedio ponderado de las últimas  $n$  señales. Se analizó el comportamiento de las señales medidas con el de la intensidad instantánea comparando las intensidades observadas y las desviaciones estándar respectivas. Para este experimento en particular se utilizó  $n$  igual a 10.

En la Figura 5 (datos en el anexo A.1) se puede apreciar el comportamiento promedio de la señal. Es fácil ver que en los tres casos se nota un patrón bastante similar de comportamiento. Como es de esperar, el promedio y promedio ponderado presentan un comportamiento representativo de la intensidad instantánea. Lo verdaderamente interesante queda a la vista al revisar la Figura 6 (datos en el anexo A.2), en ella se compara la desviación estándar de las tres mediciones. La señal instantánea posee la mayor desviación estándar mientras que el promedio posee la mínima, el promedio ponderado se encuentra en un nivel intermedio entre ellas dos.

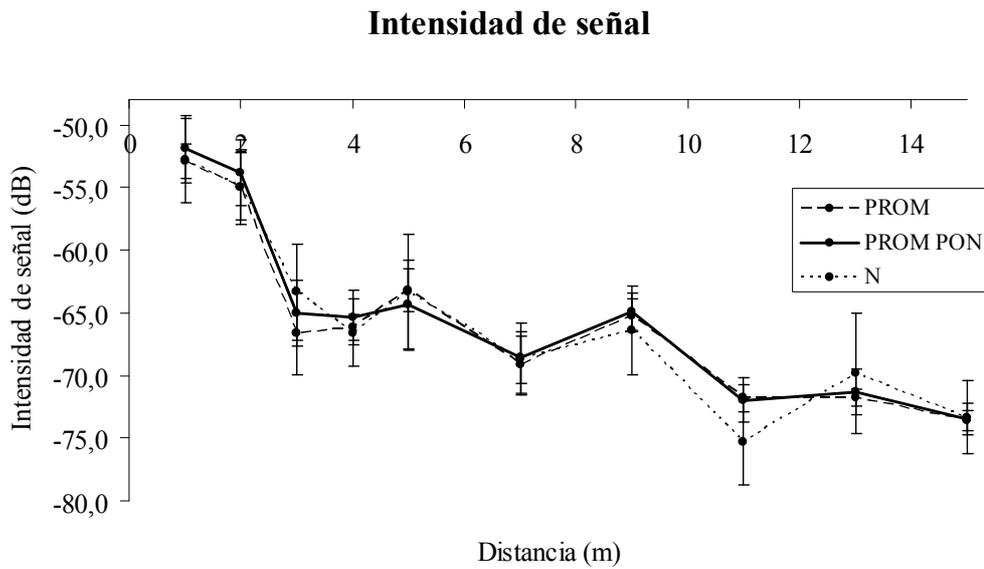


Figura 5 – Los promedios de las intensidades de señal para los tres tipos de estimación de señal

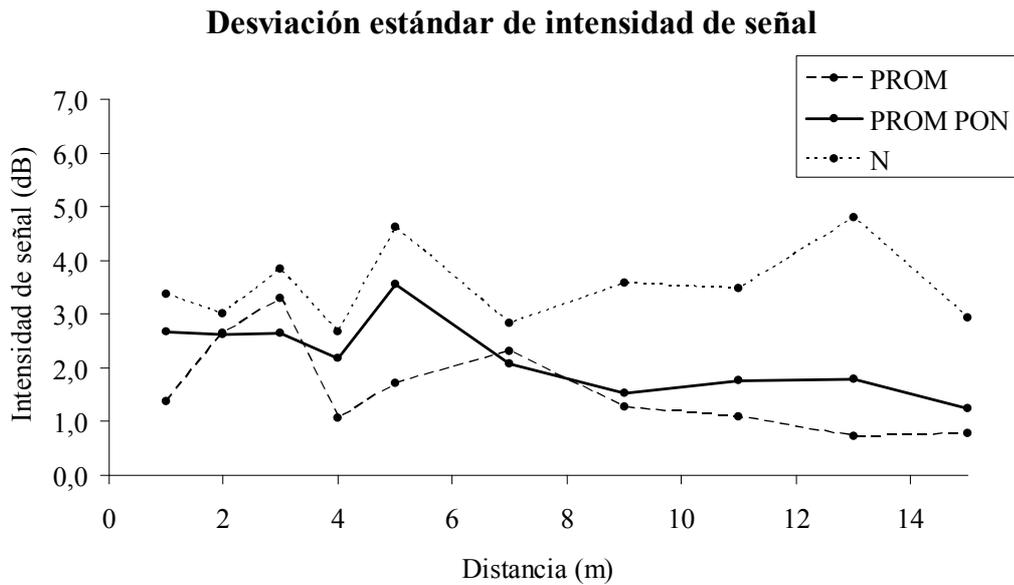


Figura 6 – La desviación estándar de las intensidades de señal para los tres tipos de estimación de señal

Esto concuerda con la intuición pues dado la alta oscilación de la intensidad WiFi es de esperar que la señal instantánea tenga una gran desviación estándar. La alta estabilidad del promedio se debe a que éste actúa como un buffer pues cada nuevo muestreo aporta muy poco al resultado final. Eso ayuda a eliminar los cambios bruscos de señal y por ende posee una desviación estándar menor.

Finalmente el comportamiento intermedio del promedio ponderado se puede explicar debido a que una nueva medición extrema altera significativamente su valor debido a que se pondera con un mayor peso que el resto, por ende su desviación estándar es mayor a la del promedio normal. Sin embargo, la ponderación de este nuevo valor es lo suficientemente pequeña como para no afectar mayormente el promedio.

A pesar de que el promedio normal posee la menor desviación estándar, este no es necesariamente el mejor indicador para el valor de la señal. En el caso en que el usuario este quieto sin duda es la mejor opción pues las  $n$  mediciones pasadas con las cuales se calcula el promedio pertenecen todas al mismo punto, sin embargo si el usuario se desplaza y cambia su distancia respecto a la señal de origen estas mediciones ya no son válidas y "envenenan" el cálculo de un estimador representativo de la señal actual del dispositivo. En efecto, mientras mayor sea este  $n$  más estable es el promedio y más se demora el modelo en aprender la nueva posición del usuario. En este caso el promedio ponderado es una mejor opción, pues se olvida más rápido de las  $n$  mediciones pasadas y el valor actual es más representativo que el promedio normal de la realidad. Dado que el usuario probablemente esté en un ambiente en el cual se encuentre en constante movimiento, se recomienda utilizar el promedio ponderado. Si pudiese el dispositivo ser capaz de distinguir entre los estados de quieto o movimiento se recomienda utilizar el indicador que minimice la desviación estándar en cada caso.

### **3.2. Bluetooth**

Dada la alta presencia de antenas bluetooth en los dispositivos móviles resulta natural investigar la posibilidad de utilizar esta tecnología para la estimación de posición del dispositivo dentro de un recinto. Para determinar si el uso de antenas bluetooth es una alternativa viable hay que investigar las interrogantes acerca de la información que es capaz de entregar, la calidad de esta información (precisión, exactitud, tiempo de respuesta, etc.) y como se compara con la entregada por la señal WiFi.

La tecnología bluetooth se ha convertido en un estándar de comunicación inalámbrica a corta distancia. La gran mayoría de los dispositivos móviles actuales poseen una antena bluetooth dedicada para la transferencia de datos entre dispositivos. Los usos más habituales suelen ser el intercambio de archivos o la interacción con distintos accesorios tales como audífonos inalámbricos o controles remotos. Dado esto la disponibilidad en los dispositivos móviles no presenta un problema de factibilidad técnica, sin embargo a diferencia de la señal WiFi no es normal tener en un recinto fuentes estáticas emisoras de señal bluetooth, por ende se requiere infraestructura adicional para poder utilizar esta tecnología.

Se experimentó con una fuente emisora de señal bluetooth USB genérica conectada a computador de escritorio y un dispositivo móvil HTC Diamond Touch [Htc09]. Se midió a intervalos regulares de distancia y se decidió revisar la intensidad de señal, la cantidad de veces que se detecta la presencia de la señal y el tiempo que se demora en escanear el ambiente para determinar la presencia de la señal. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 7.

Distancia	1m	2m	3m	5m	1m	2m	3m	5m
Medición	Intensidad	Intensidad	Intensidad	Intensidad	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo
Valores	0,00	-7,00	-1,00	-1,00	11,00	10,00	11,00	11,00
	0,00	-7,00	-4,00	-1,00	10,00	10,00	11,00	10,00
	0,00	-4,00	0,00	-7,00	11,00	11,00	10,00	10,00
	-1,00	-7,00	-1,00	-1,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	0,00	-7,00	0,00	-1,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	0,00	-4,00	0,00	-1,00	10,00	10,00	11,00	11,00
	N.V.	-7,00	0,00	-1,00	10,00	10,00	11,00	10,00
	-4,00	-7,00	0,00	-7,00	10,00	11,00	10,00	10,00
	0,00	-4,00	N.V.	-1,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	-1,00	-10,00	-4,00	-1,00	11,00	10,00	11,00	10,00
	0,00	N.V.	-4,00	-1,00	10,00	17,00	10,00	11,00
	0,00	-7,00	-4,00	-1,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	-1,00	-4,00	-4,00	-1,00	10,00	18,00	10,00	10,00
	0,00	-10,00	-4,00	-1,00	10,00	10,00	11,00	10,00
0,00	N.V.	0,00	-1,00	11,00	19,00	10,00	10,00	
Promedio	-0,50	-6,54	-1,86	-1,80	10,27	11,73	10,40	10,20

Figura 7 – Tabla con los valores de intensidad de señal y tiempo que tomo realizar la medición a distintas distancias. Las celdas N.V. corresponden a valores no validos producto de un error en la medición

De los gráficos se puede inferir que el tiempo de detección promedio ronda los diez segundos. Para fines prácticos, esto es de alto costo y puede producir un retardo tremendo en la información si el usuario se encuentra en movimiento, haciéndola inviable en este caso. La intensidad de la señal es bastante aleatoria y no parece seguir un patrón definible que permita crear una relación biyectiva de la distancia esperada en función de la señal observada. Por ende tampoco se puede utilizar este parámetro como una métrica para estimar la posición. La única opción disponible es utilizar la señal bluetooth como una medida binaria, es decir, solamente utilizar la presencia o ausencia de antenas para estimar la posición debido a que la señal bluetooth tiene un rango práctico de visión mucho menor a la señal WiFi. Para comprobar la viabilidad de la solución se requiere más experimentación, la cual no se justifica pues requiere infraestructura adicional que no se encuentra en la mayoría de los recintos objetivos.

### **3.2. Sensores de Movimiento**

Otra característica que se vuelve cada día más popular en los dispositivos móviles es poseer algún tipo de sensor de movimiento incorporado en el sistema. Estos generalmente permiten hacer la experiencia con el usuario más interactiva ya que reacciona según la manera en que es manipulado el dispositivo. Un ejemplo de esto sería ajustar automáticamente la pantalla del dispositivo según la orientación con la cual se toma o navegar a través del menú inclinando el dispositivo. Algunos dispositivos que incluyen estas funcionalidades son el iPhone de Apple, la línea Omnia de Samsung o la mayoría de la línea Touch de HTC, en particular se experimento con un dispositivo HTC Diamond Touch.

Entre los sensores de movimiento disponibles en la actualidad de distintas marcas, los acelerómetros parecen ser el tipo más popular. Este componente entrega un vector con el valor de la aceleración actual en los tres ejes del espacio. En particular el dispositivo es capaz de detectar la aceleración producida por el campo gravitatorio del planeta tierra, lo que permite que el dispositivo pueda detectar su inclinación con respecto al plano de la superficie terrestre. Otro sensor que va ganando popularidad es el compás magnético, el que permite obtener la posición respecto al dispositivo del polo magnético terrestre. Actualmente la versión más reciente de los iPhone y los Omnia II los incluyen.

El dispositivo con el cual se experimentó sólo posee un acelerómetro. Se creó un programa que mostraba en pantalla la aceleración actual en los tres ejes. El dispositivo es efectivamente capaz de determinar la dirección de la aceleración gravitatoria y estimar su orientación con respecto a él (por ejemplo si está de cabeza, de lado, etc.) con un tiempo de respuesta casi inmediato. Obtener información adicional del dispositivo sin embargo no es trivial. Es difícil separar la aceleración producida por la interacción humana de la producida por el campo gravitatorio para así poder estimar los movimientos realizados por el usuario. Adicionalmente el acelerómetro sólo muestra la orientación del dispositivo con respecto a dos ejes del espacio. Hay un tercer eje que se pierde y no se es capaz de determinar. Suponiendo que la superficie terrestre esta compuesta por los ejes X y Y, el acelerómetro solo es capaz de determinar la rotación del dispositivo con respecto a ellos y no la rotación con respecto al eje Z (la cual si es capaz de entregar una brújula). Este problema sin embargo se puede solucionar con la incorporaron del compás digital a la solución [Enk08]. Se cree que esta es un área de estudio que puede ayudar a estimar de manera exitosa la posición del usuario, sin embargo, escapa a los alcances de este trabajo.

#### **4. Solución Propuesta**

La solución propuesta se basa en los modelos de los casos exitosos de localización basada en WiFi [You05] [Cas08] [Lad02] evitando caer en los altos tiempos de entrenamiento necesarios. Para lograr ésto se reemplaza la etapa de muestreo de datos y entrenamiento, por la estimación de los valores teóricos esperados del entrenamiento en una etapa de preproceso (con todo el error asociado que esto implica). En caso de ser necesario siempre pueden ser reemplazados más tarde por valores reales del muestreo. Estos datos son utilizados en el ciclo principal para estimar las posiciones posibles en las cuales se puede encontrar el usuario. El criterio ocupado para determinar la posición se basa en la búsqueda de los puntos que minimizan el error asociado entre el modelo del preproceso y los valores actuales. Cada uno de estas etapas se detalla en los subcapítulos siguientes.

#### 4.1. Pre-proceso

El pre-proceso consiste en la etapa previa a la puesta en funcionamiento del programa. En ella se cargan los mapas respectivos y se preprocesa toda la información inmutable durante la ejecución a modo de acelerar el proceso de detección de posición. El primer paso es conseguir un mapa a escala del recinto sobre el cual se desea trabajar (Figura 8). La cantidad de detalle del mapa no es importante, solo la escala. Luego hay que definir los puntos de acceso que se utilizarán como referencia en el proceso de detección, esto consiste en determinar la posición geográfica relativa al punto de origen del mapa (Figura 9) y la dirección de red física (dirección MAC) de cada punto de acceso. Es importante recalcar que estos puntos de acceso deben ser estáticos dentro del recinto.



Figura 8 – Mapa del recinto a monitorear



Figura 9 – Mapa del recinto a monitorear con los puntos de referencia definidos en el espacio

El paso siguiente es discretizar el espacio (Figura 10), creando celdas de tamaño fijo sobre las cuales se realizarán los cálculos de intensidad de señal. En particular para cada punto dentro de la malla se precalcula el valor teórico esperado de cada punto de

referencia. Este valor se calcula en base a un modelo de propagación de señal definido para cada fuente de señal. En la Figura 11 se puede apreciar una representación de la superposición de las intensidades de todas las fuentes.

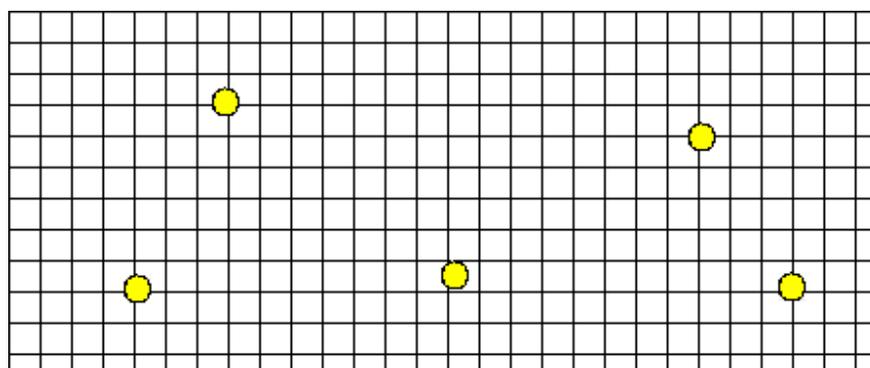


Figura 10 – Modelo discreto del espacio a monitorear manteniendo los puntos de referencia

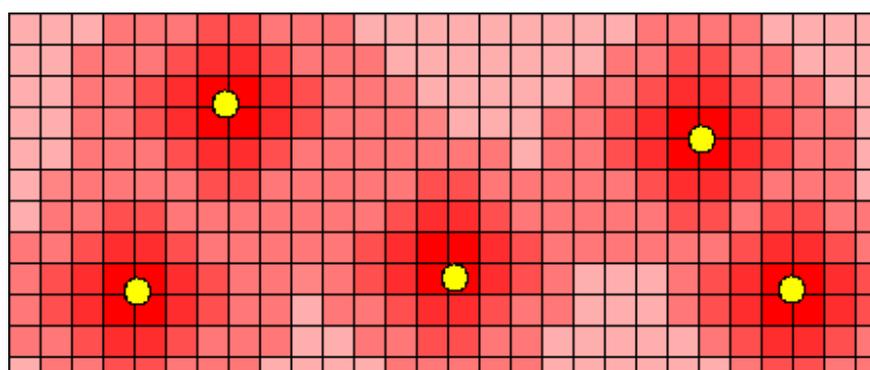


Figura 11 – Estimación del modelo de propagación y decaimiento de señal en el espacio discreto a monitorear

Este modelo debiese ser único para cada punto de acceso debido a que la propagación depende tanto de la fuente como de la interferencia de señal producida por los elementos estáticos del recinto (muros, puertas, otras señales, etc.). La manera comúnmente utilizada para modelar este comportamiento es tomar un gran número de muestras de la señal en cada punto y de ellos inferir el modelo de propagación. Esto es contradictorio con el objetivo de minimizar el tiempo de entrenamiento y configuración previa. La solución es eliminar completamente la fase de entrenamiento suponiendo propagación radial de la señal en cada fuente con un modelo de decaimiento obtenido a través de la experiencia empírica. Para el tipo de aplicación a desarrollar es aceptable el incurrir en un error más grande a cambio de tiempo de configuración más pequeño.

De esta manera los datos de entrada del proceso de pre-configuración son el mapa del recinto con su escala y el listado de puntos de referencia, con su posición y dirección de red física. Se obtiene el modelo de propagación de señal del recinto, el programa internamente hace todos los cálculos necesarios, eliminando completamente la fase de entrenamiento.

## **4.2. Ciclo Principal**

El ciclo principal tiene como objetivo mantener actualizada la posición actual del usuario dentro del recinto. Para ello, en cada iteración la aplicación actualiza los datos de estimación actual y calcula el área que mejor se ajusta para determinar la posición.

La alimentación de los datos para determinar la posición se obtiene el escaneo del estado de las señales WiFi visibles en la iteración actual. En este paso se determina cuales señales se encuentran dentro del rango actual de detección del dispositivo y la intensidad actual de cada señal. La alta variabilidad de la intensidad no permite que sea usada directamente para el calculo de la posición, los datos deben ser suavizados antes de estimar sobre ellos. En efecto, la lista de señales es alimentada a una componente que es capaz de entregar la intensidad actual, un promedio de las últimas n señales y un promedio ponderado de las últimas n señales en el cual los valores más recientes tienen un mayor peso en la ponderación, de esta manera se tienen dos estimadores distintos que suavizan la varianza intrínseca de la intensidad de señal WiFi. En la práctica siempre se utiliza el promedio ponderado, ya que se adapta mejor al caso de uso real de personas que están en constante movimiento. Siempre que mencione que se utiliza la intensidad de señal para determinar la posición, se refiere al promedio ponderado de la intensidad de señal.

El modelo utilizado para determinar la posición actual busca encontrar las celdas de la malla que minimizan el error entre las intensidades muestreadas y las intensidades teóricas en dichos puntos. De esta manera se procesa cada celda de la grilla, determinando cual es el punto con el error mínimo y se proponen como posibles

candidatos todos los puntos que caen dentro de un cierto rango con respecto a el. Al final de la iteración se obtiene un conjunto de puntos posibles en donde se puede encontrar el usuario. El peor caso es aquel en que estos puntos no conforman un único conjunto conexo sino que conforman varios grupos de áreas posibles. Cualquiera sea el caso, el quedarse solo con el punto de error mínimo no es la mejor opción, sino tomar la decisión en base a estos conjuntos de puntos y a la historia reciente. La alternativa actualmente implementada promedia las posiciones de todos los puntos resultantes de la predicción.

### 4.3. Algoritmo de Ponderación del Error

Sea U el conjunto de todas las fuentes de señal que se utilizan como referencia y U' el conjunto de las n señales más fuertes. Para cada X en U' se llama  $X_m$  a la señal muestreada de la fuente X y  $X_i$  la señal teórica de fuente X en la posición i. La fórmula del cálculo del error para el punto i es de la forma:

$$Error_i = \sum_{X \in U'} (X_m - X_i)^2 \times f(X_m, X_i)$$

La precisión de la medición de una señal decae a medida que esta se va haciendo más débil. Debido a esto se decidió hacer la estimación con el conjunto U' y no con U a fin de disminuir el error que pueden aportar las señales no presentes en U'. Con la misma intención se decide ponderar el error cuadrático por una función f que permite ponderar los errores de las señales más débiles de por un mayor valor que los errores de las señales más fuertes. Se tomó la decisión de no utilizar solo el error sino el error cuadrático pues este último distribuye más equitativamente el error entre los puntos. En efecto, el error cuadrático prefiere los puntos con errores muy similares en todas las fuentes de señal a puntos con errores muy dispares entre ellas (muy bajo con respecto a una y muy alto con respecto a otra).

La toma de decisión acerca de la posición puede ser mejorada más aun si no solo se basa en el cálculo numérico para la toma de decisiones, sino en decisiones analíticas

impulsadas por el sentido común. Un ejemplo concreto es el hecho que los usuarios no son capaces de trasladarse grandes distancias de manera instantánea, de esta manera el error de los puntos lejanos a la posición actual del usuario debiesen ser ponderados por un factor mayor con respecto a los puntos cercanos. Si se detecta que la nueva posición esta a una distancia infactible con respecto a la posición anterior (ie. a más de 30 metros y han transcurrido solo 1 segundo), esta no se actualiza hasta que se confirme este cambio brusco de posición en una próxima iteración. Otras maneras posibles apoyar la ponderación del error es investigar las costumbres de los usuarios y ponderar por un mayor valor los lugares menos frecuentados además de ponderar por un valor "infinito" los lugares donde se sabe nunca están o no es posible estar (ie. un pilar, una oficina a la cual nadie tiene acceso, etc.).

#### **4.4. Análisis y Comparación de la Solución Propuesta**

La solución propuesta se basa en algunas de las ideas mejor aceptadas de las soluciones actuales, sin embargo se produce una gran diferencia al tener como motivación el evitar la etapa de entrenamiento. Las ventajas y desventajas se manifiestan principalmente en distintos niveles de exactitud al momento de predecir, diferencias en los costo de recursos humanos (tiempo de implementación, configuración, entrenamiento, etc.) y costos de recursos de proceso (memoria y tiempo de proceso).

Desde el punto de vista de los recursos humanos el modelo propuesto tiene la ventaja de ser muy simple de llevar a la práctica y aplicable a un caso real, además la configuración de los mapas escala muy suavemente a recintos grandes. Adicionalmente la solución propuesta se adapta muy bien al cambio, la mayoría de las soluciones basadas en muestreo de perfiles de señales muestran problemas al añadir o quitar un punto de acceso, generalmente causando que la etapa de entrenamiento y toma de muestras deba repetirse. Un punto en contra sin embargo es que dado que el algoritmo de localización se basa en la comparación de la intensidad de señal actual obtenida con la intensidad teórica de cada punto, es muy susceptible a fallas si el valor teórico es muy erróneo. Un ejemplo de esto puede ser un mapa mal configurado (puntos

intercambiados o con sus posiciones erróneas) o simplemente un recinto en el cual el decaimiento radial o la tasa con la cual decae no modela adecuadamente el comportamiento de las señales debido a la alta interferencia. De esta manera, el costo en recursos humanos y tiempo de implementación es muy bajo a expensas de un mayor error en la predicción pero dentro de lo razonable y útil para distintas aplicaciones.

La solución propuesta es capaz de resolver el problema del intercambio entre costo de recursos humanos y error, debido que al discretizar el espacio es posible "parchar" un comportamiento distinto (valores teóricos distintos) a cada celda del espacio si es necesario. De esta manera, si el modelo original de decaimiento radial (cuyo costo de implementación es casi nulo) cubre adecuadamente un 95% del área a estudiar solo se debe invertir tiempo y recursos en "parchar" el 5% restante a través de una toma de muestras en los puntos interesados. Esto contrasta con la mayoría de los modelos actuales que requieren que la toma de muestras se haga a priori en el 100% del área interesada. Así, se puede apreciar que la solución propuesta converge a las soluciones actuales en el peor caso (con todos los costos y mejoras en la precisión que ello implica).

Desde el punto de vista de la implementación, el algoritmo utiliza principalmente la memoria para guardar los valores del preproceso y ocupa fuertemente el procesador en el ciclo principal. En el preproceso se guarda una copia de la discretización del mapa para cada fuente de señal sobre la cual se guardan los valores teóricos esperados. La cantidad de memoria reservada en el preproceso es proporcional al número de fuentes de señal y al tamaño del mapa. Sea  $T$  el tamaño del mapa,  $P$  la granularidad con la cual se desea discretizar el espacio y  $N$  el número de puntos de referencia que emiten señal, el orden de la cantidad de memoria reservada se puede expresar como:

$$Memoria = T \times P \times N$$

En el caso de un mapa de tamaño 25m x 25m, con 7 fuentes de señal y una granularidad de 1 medición cada 2 metros cuadrados el orden de memoria sería:

$$Memoria = (25_m \times 25_m) \times \left(\frac{1}{2_{m^2}}\right) \times 7$$

En el ciclo principal se debe calcular el error estimado para cada punto del mapa con los n puntos de referencia con señal más fuerte. Sea T el tamaño del mapa, P la granularidad con la cual se discretiza el espacio y N' los n puntos de referencia con la señal más fuerte, el orden del costo de proceso del ciclo principal se puede expresar como:

$$Tiempo \ de \ proceso = T \times P \times N'$$

Los costos del algoritmo dependen linealmente del tamaño del mapa y del número de puntos de referencias a utilizar. Si en algún momento estos números llegasen a ser demasiado grandes siempre se puede bajar la granularidad (por ejemplo, discretizar cada 1,5 metros en lugar de cada 50 centímetros) para compensar.

## **5. Implementación de la Solución**

### **5.1 Plataforma Objetivo**

La plataforma objetivo de la solución corresponde a dispositivos móviles con Windows Mobile como sistema operativo. En su edición más reciente Windows Mobile 6 presenta tres tipos distintos de versiones Professional, Standard y Classic las cuales no son completamente compatibles entre sí. Las diferencias principales se pueden resumir en que la versión Professional está pensada para teléfonos con pantalla táctil, la versión Standard para teléfonos sin pantalla táctil y la versión Classic para PDA's sin función de teléfono. En particular se utilizó un teléfono HTC Diamond Touch [Htc09] para desarrollar y realizar la mayoría de las pruebas, este dispositivo cuenta con Windows Mobile 6.1 Professional.

Como entorno de desarrollo se utilizó Visual Studio 2005, esto es debido a que la mayoría de bibliotecas están hechas para ser utilizadas con este IDE. El SDK corresponde a Windows Mobile 6 Professional Software Development Kit Refresh. El lenguaje elegido para la programación corresponde a C#.

## **5.2 Bibliotecas Utilizadas**

Para el desarrollo de la solución y las pruebas de conceptos hay tres bibliotecas que se utilizaron, cada una encargada de interactuar con una de las componentes del teléfono. El acceso a la señal WiFi se accedió a través de OpenNETCF, la antena bluetooth a través de 32Feet .NET y para el acceso a los sensores de movimientos se utilizó HTC's Sensor API.

### **5.2.1. OpenNETCF**

OpenNETCF [Ocf09] es una colección de librerías para .NET Compact Framework, cuyo objetivo es simplificar el proceso de desarrollo de aplicaciones al proveer extensiones de las funcionalidades del núcleo de .NETCF. Generalmente estas funcionalidades son de muy bajo nivel y la única manera de acceder a ellas en el mejor de los casos es usando de código C++, OpenNETCF se encarga de encapsular las necesidades más comunes y exponer una interfaz para acceder a ellas en código C#.

Contrario a lo que el prefijo Open puede llevar a pensar, la biblioteca no se adhiere a ninguna causa de código abierto, OpenNETCF pertenece a OpenNETCF Consulting y ofrece la biblioteca en tres versiones distintas, Professional Edition, Standard Edition y Community Edition. Las posibilidades son las mismas con las tres versiones, los archivos compilados son los mismos, la única diferencia corresponde a la documentación y soporte que la empresa ofrece. Adicionalmente las versiones pagadas ofrecen mayor soporte y ayuda integrada al IDE de desarrollo.

Para el desarrollo se utilizó OpenNETCF 2.3.0.39 Community Edition la cual corresponde a la opción gratuita disponible para el desarrollo. Esta versión viene con poca documentación incluida, sin embargo es posible encontrar información disponible

en la Web para iniciarse en el desarrollo. En particular, resultaron ser de extrema utilidad los ejemplos presentes en la página oficial de OpenNETCF y en el portal oficial de desarrollo de Microsoft para dispositivos móviles MSDN Windows Embedded Developer Center. Ambas páginas se pueden encontrar en las siguientes direcciones respectivamente:

- <http://blog.opennetcf.com/ctacke/binary/WiFiDiscovery.htm>
- <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa446491.aspx>

La biblioteca contiene una gran variedad de clases para interactuar con las redes de datos, pero para el problema a solucionar solo se necesita un par de ellas. En ambas páginas se puede encontrar un diagrama de clases de alto nivel de las clases necesarias para el descubrimiento de redes WiFi, este diagrama se puede apreciar en la figura 12.

La clase Adapter representa cualquier adaptador de red Ethernet en el sistema, ya sea alámbrico o inalámbrico. Las diferencias entre las distintas interfaces de red se pueden detectar analizando las variables de instancia de cada Adapter. Una AdapterCollection no es más que una clase que sirve para agrupar un conjunto de Adapters, es la estructura que devuelve el dispositivo cuando se pide que entregue la lista de todos los adaptadores de red disponibles en el sistema. Una lógica similar ocurre en las clases AccessPoint y AccessPointCollection, un AccessPoint corresponde a una instancia que representa un punto de acceso visible por el dispositivo y sus variables de clase describen sus propiedades. Para la implementación de la solución resulta útil conocer la dirección de red física y la intensidad de la señal. El ciclo lógico en el cual se utilizan estas clases es el siguiente:

- Al iniciar la aplicación se pide al dispositivo móvil que entregue una lista de todos los adaptadores de red disponibles, esto se muestra en la forma de una instancia de la clase AdapterCollection
- Se recorren los elementos de tipo Adapter contenidos en AdapterCollection en busca del adaptador de red que corresponde a la antena WiFi

- Con el Adapter definido, se le pide una lista de todos los puntos de accesos visibles, esto se obtiene como una instancia de la clase `AccessPointCollection`, la cual es única para cada adaptador
- Durante el ciclo principal de ejecución, se refresca la instancia `AccessPointCollection` para obtener una lista actualizada de los objetos de tipo `AccessPoint` visibles en cada momento
- Se recorre la lista de `AccessPoint` buscando aquellos que son de interés para determinar la posición, identificándolos por su `MAC Address` y obteniendo la intensidad de la señal actual

Traducido a código C# y simplificado se despliega de la siguiente forma:

```
// La interfaz y la colección de puntos de acceso
WirelessZeroConfigNetworkInterface m_wzc;
AccessPointCollection apcollection;
// Se busca por la interfaz WiFi
foreach ( INetworkInterface ni in NetworkInterface.GetAllNetworkInterfaces() )
{
    if ( ni is WirelessNetworkInterface && ni is WirelessZeroConfigNetworkInterface )
    {
        m_wzc = ni as WirelessZeroConfigNetworkInterface;
        break;
    }
}
// Se obtiene la colección de puntos de accesos visibles
apcollection = m_wzc.NearbyAccessPoints;
[ ... ]
// Ciclo principal
while ( true )
{
    // Se refresca la lista de puntos de accesos visibles
    apcollection.Refresh();
    foreach (WirelessAP ap in aps)
        // Se realiza todo el proceso de calculo y estimación de posición
        [ ... ]
}
```

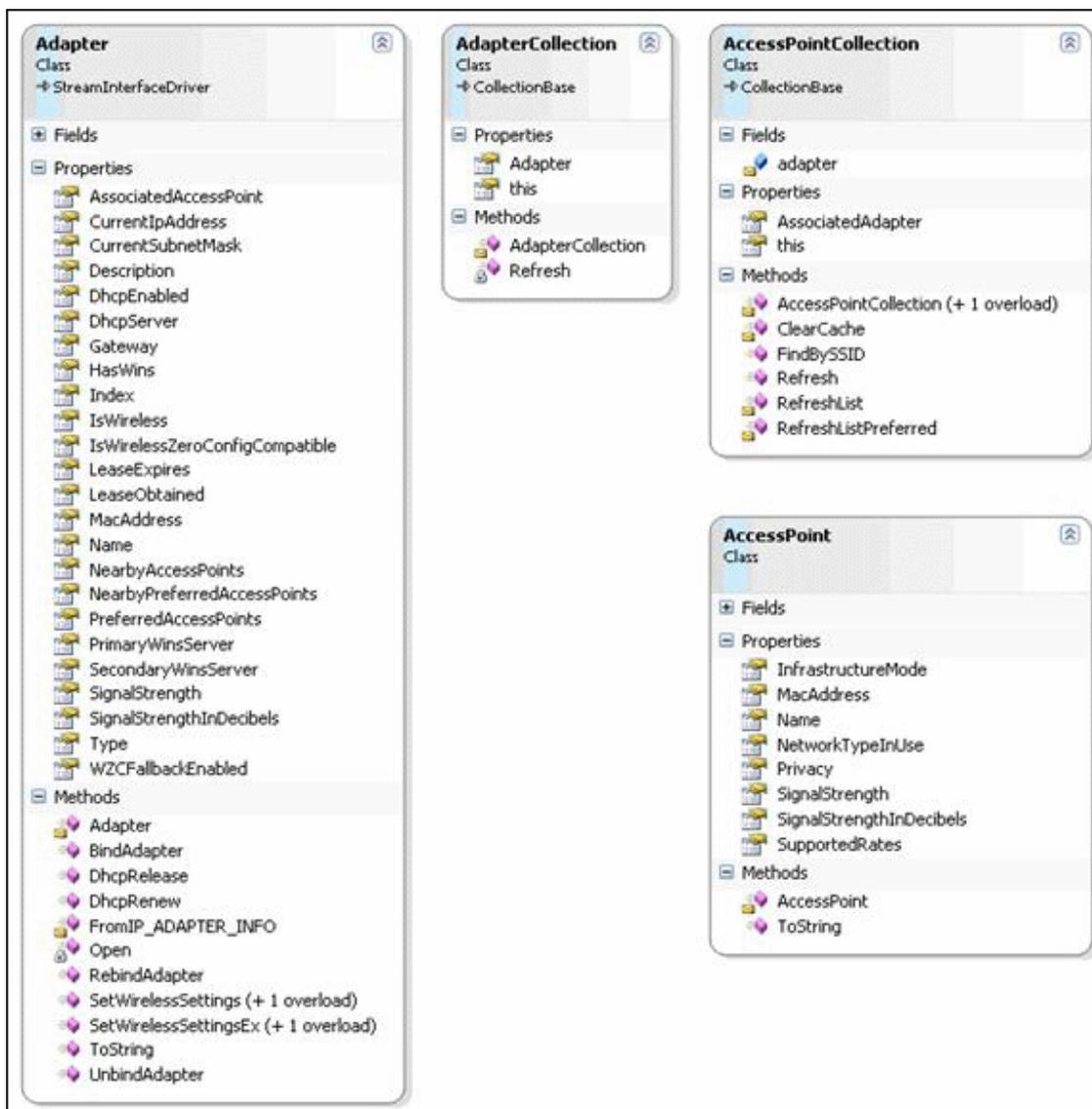


Figura 12 - Diagrama simple de clases necesarias para la detección de Redes WiFi [Ncf06]

## 6. Resultados

Para medir la calidad de los resultados se decidió implementar el mapa de un recinto real. El principal indicador medido es el error en metros que entrega la estimación en ciertos puntos de interés, sin embargo hay otras cualidades que también vale la pena analizar. La capacidad de corrección y mejoramiento de la señal en conjunto con estudiar como cambia el comportamiento entre distintos terminales son puntos interesantes a considerar para el éxito de la aplicación.

Para el experimento se construyó el modelo del tercer piso del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile. En este recinto se utilizaron siete puntos de accesos existente en las instalaciones para cubrir un área de aproximadamente 1320 metros cuadrados. Como base para la construcción se utilizó el mapa de la Figura 13, para determinar las dimensiones del recinto se utilizó una fotografía satelital de Google Maps y se estimo que las dimensiones aproximadas del recinto son de 55 x 24 metros.

Los puntos de acceso que se utilizaron para la estimación corresponden a los círculos de la Figura 14. Los lugares de interés en los cuales se realizaron las mediciones están enumerados y se encuentran representados por un cuadrado. La posición denotada por una estrella corresponde a un punto de referencia especial que debió ser añadido para un experimento en particular, ya se darán más detalles. El error en las distintas pruebas se mide como la distancia entre la ubicación real del usuario y la posición estimada por la aplicación. Debido a que esta posición estimada suele no ser única en el tiempo, se tomaron diversas muestras en cada punto y se calculo el promedio.



Figura 13 – Plano del recinto

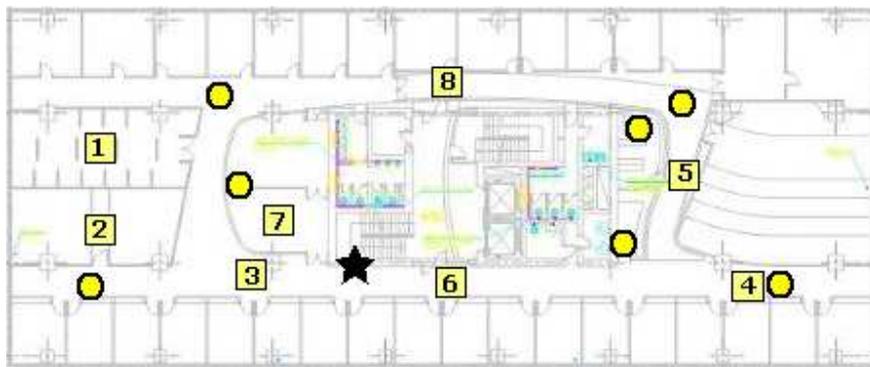


Figura 14 – Plano del recinto con los puntos de interés. Círculos: puntos de referencia. Cuadrados enumerados: puntos medidos. Estrella: punto de referencia especial

## 6.1 Primeros resultados

Como primera experimento se decidió medir el comportamiento de la aplicación en el mismo dispositivo con el cual se creó el modelo. Este corresponde a un HTC Diamond Touch (por simplicidad se referirá a este teléfono como DT). Para esta prueba no se realizó ningún ajuste al modelo, es decir, todos los puntos de acceso decaen con a la misma tasa y en los mismos rangos que el modelo planteado en la sección 5.1.1. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 15. En general los rangos de error son muy similares con la excepción de dos puntos de interés. El primero de ellos corresponde al punto 4 y es una medición realizada muy cerca de un punto de referencia, como es de esperar el margen de error es muy pequeño debido a la alta intensidad de señal. El segundo corresponde al punto 6 donde todas las señales llegan con una intensidad relativamente débil o inadecuada para el modelo, el margen de error es demasiado

grande para ser de utilidad. Este último punto resulta interesante para el estudio y la investigación acerca de como mejorar la estimación.

Punto	Dispositivo	Error Promedio (metros)	Desviación estándar (metros)
1	HD1	4,61	0,61
2	HD1	2,79	0,21
3	HD1	8,74	1,38
4	HD1	1,11	0,00
5	HD1	3,26	0,64
6	HD1	22,05	6,01
7	HD1	4,44	0,40
8	HD1	9,17	0,79

Figura 15 – Tabla de los errores medidos en los distintos puntos con el dispositivo DT

## 6.2 Prueba con un segundo dispositivo

Otro de los aspectos a investigar es el comportamiento del modelo en otro terminal. En este caso el experimento es el mismo de la sección anterior, sin embargo el equipo utilizado corresponde a un HTC Diamond Touch 2 (por simplicidad se referirá a el como DT2). Se observa que en un mismo punto las intensidades de señales que llegaban al dispositivo DT2 eran significativamente más débiles que las observadas por el dispositivo DT, del orden de 10 dB. En este contexto el modelo tal cual como estaba planteado no es válido. La solución para este problema es ajustar la curva de decaimiento por una constante intrínseca y representativa de cada dispositivo. Se asume que si bien la señal es más tenue pues la intensidad posee una tasa de decaimiento mayor (probablemente debido a una antena más débil) el comportamiento de la curva debiese ser similar. Se estimo que la potencia recibida por la antena del DT2 correspondía aproximadamente al 0.85 de la intensidad recibida por el DT. Este número es solo un estimado basado en la experiencia obtenida en un par de puntos del recinto, no necesariamente refleja el comportamiento de todo el espacio observado. Los resultados obtenidos muestran que a pesar de lo arbitrario de la elección de la constante, estos mejoraron significativamente, incluso mejores que aquellos logrados con el dispositivo DT. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 16. Esto hace pensar que debe haber una constante óptima por la cual multiplicar el modelo la cual

resulta de una mezcla de una constante propia del terminal y otra de la interferencia del recinto a medir.

Punto	Dispositivo	Error Promedio (metros)	Desviación estándar (metros)
1	HD2	4,60	1,39
2	HD2	2,38	0,45
3	HD2	5,31	1,93
4	HD2	1,00	0,00
5	HD2	2,89	0,83
6	HD2	10,16	3,64
7	HD2	5,51	1,01
8	HD2	6,50	1,25

Figura 16 – Tabla de los errores medidos en los distintos puntos con el dispositivo DT2

### 6.3 Parche de puntos muertos

En el experimento realizado se aprecia que el punto 6 tiene el mayor grado de error asociado en ambos dispositivos. Esto probablemente debido a lo débil de la señal o al modelo teórico del punto el cual no es representativo del comportamiento real. Se decidió añadir una referencia más para parchar esta zona, este es el punto representado por una estrella en la figura 14. El proceso de añadir este punto al modelo es sumamente simple y no toma más de diez minutos. Los resultados del error en este mismo punto con este nuevo mapa se pueden apreciar en la Figura 17.

Punto	Dispositivo	Error Promedio (metros)	Desviación estándar (metros)
6*	HD1	5,26	0,82
6*	HD2	5,92	1,49

Figura 17 – Tabla de los errores medidos en el punto 6 con los dispositivos DT y DT2

## 7. Conclusiones y Trabajo a Futuro

A raíz del trabajo realizado, se puede considerar exitoso el desarrollo de la aplicación de detección de posición para recintos interiores. Para que la aplicación fuese de utilidad esta debe ser capaz de detectar y difundir la posición de un dispositivo con un error moderado, existen numerosas soluciones que ya realizan esto y con un menor error. Sin embargo el problema planteado tiene restricciones particulares que deben ser cumplidas, estas son:

1. La construcción del modelo debe requerir sólo las capacidades del dispositivo y utilizar la infraestructura del recinto. Esto se logro cumplir con éxito ya que es normal que hoy en día la mayoría de los recintos se encuentren iluminados con múltiples señales WiFi. Incluso si es necesario introducir infraestructura, esta es levemente invasiva y los costos son bajos.
2. La rapidez de la construcción del modelo es un punto crítico. A diferencia de las aplicaciones que toman una gran cantidad de muestras a priori. Esta implementación estima estas mediciones, eliminando una gran parte del tiempo necesario para implantar la aplicación. Ante el cambio de la infraestructura del recinto la aplicación requiere poca intervención para adaptarse a la nueva realidad, como se puede apreciar en la sección 6.3.
3. El rango de error está dentro de los parámetros aceptables, se necesita que la posición reportada por un dispositivo sea lo suficientemente precisa como para que otra persona pueda encontrarlo. En el capítulo 6 se puede apreciar que el error promedio generalmente corresponde a un par de metros e incluso en el caso de que error se dispare, es posible mejorarlo considerablemente agregando nuevos puntos de referencia.
4. La extensibilidad del modelo es un punto importante ya que permite añadir nuevas funcionalidades, como información aportada por el sensor de movimiento. Es posible observar en el capítulo 4 que el algoritmo intenta minimizar el error, no toma en cuenta directamente las señales WiFi. Es fácil agregar al modelo nuevos

elementos que aumenten o disminuyan el error en cada punto.

5. Uno de los principales problemas de tomar mediciones a priori es que estas son totalmente dependientes del aparato con el cual se realizó el muestreo. La solución propuesta permite lidiar con la heterogeneidad de las antenas entre los distintos dispositivos, esto se puede apreciar en el capítulo 6.2.

Sin embargo la solución propuesta no esta exenta de problemas, el modelo teórico no es más que una aproximación y para su correcto funcionamiento puede requerir mucha configuración en recintos donde la señal no siga la degradación esperada. De todas maneras, se espera que en el peor caso el modelo degrade en las soluciones donde se toman muestreos punto a punto y se alcance un rango de error aceptable aunque peor que el de las soluciones pensadas con esta mentalidad desde un principio.

Las características desarrolladas en esta aplicación permiten que sea aplicable en diferentes ámbitos de localización. La poca configuración previa requerida y la relativa simpleza con la cual se puede adaptar a distintos dispositivos permiten implantarlo en un caso de uso real. En el contexto de un sistema de apoyo para recintos cerrados, en particular en el caso de hospitales resulta sumamente versátil. En efecto el trabajo desarrollado puede utilizarse como base para una aplicación que permita alertar a los trabajadores cuando una persona con la cual se requiere hablar encuentra cerca, comunicar la posición de otra persona que se necesita ubicar con urgencia o incluso levantar servicios basados en la posición de usuarios respecto al entorno o entre ellos. Por ejemplo, activar la grabadora cuando dos personas están muy cercanas o recibir un archivo con información actualizada.

Finalmente, el trabajo realizado da pie a futuras mejoras e investigaciones, la mayoría de ellas enfocadas a mejorar el error e investigar la posibilidad de adaptar el modelo estimado en base unas pocas mediciones reales. Determinar un método de estimar la constante intrínseca de cada dispositivo presentada en el capítulo 6.2 y ver si es posible automatizar este proceso. Optimizar la discretización del espacio, utilizar alguna estructura que permita tener distintos niveles de detalle reduciendo el espacio en

memoria y el tiempo de proceso. Investigar si se puede sacar mayor provecho a los sensores de movimiento y ver si es posible interpolar los movimientos del usuario en base a estos datos. Independiente del área que se desee mejorar no hay que perder de vista la visión original que la creación del modelo sobre el cual se va a trabajar debe ser simple, fácil de modificar y rápido de implementar.

## 8. Bibliografía y Referencias

- [Ald04] Aldunate, R., Nussbaum, M., Peña-Mora, F. An Empirical Wi-Fi Based Location Mechanism for Urban Search and Rescue Operations. Proceedings of WWIC'04, pp. 48-61. 2004.
- [Bah00] Bahl P, Padmanabhan V.N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system. In: INFOCOM, pp 775-784. 2000.
- [Bel09] Belkin Wireless-G Router F5D7230-4. URL: [http://www.belkin.com/IWCatProductPage.process?Product\\_Id=136493](http://www.belkin.com/IWCatProductPage.process?Product_Id=136493).  
Última visita: Noviembre del 2009.
- [Cai08] Cai, Y., Xu, T. Design, analysis, and implementation of a large-scale real-time location-based information sharing system. In Proceeding of the 6th international Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '08). ACM Press, pp. 106-117. Breckenridge, CO, USA, June 17 - 20, 2008.
- [Cas08] Castro, L.A.; Favela, J.; Reducing the Uncertainty on Location Estimation of Mobile Users to Support Hospital Work. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Volume 38, Issue 6, pp. 861–866, Nov. 2008.
- [Eka09] Ekahau v.3.1. URL: <http://www.ekahau.com>. Última visita: Marzo del 2009.
- [Enk08] Enkin. URL: <http://www.enkin.net/>. Última visita: Noviembre del 2009
- [Gmm09] Google Maps Mobile. URL: <http://www.google.es/gmm>. Última visita: Marzo del 2009.
- [Gui08] Guillemette, M. G., Fontaine, I., and Caron, C. Hybrid RFID-GPS Real-Time Location System for Human Resources: Development, Impacts and Perspectives. In Proceedings of the 41st Annual Hawaii international Conference on System Sciences HICSS. IEEE Press. Washington, DC, January 07 - 10, 2008.
- [Her08] HereCast. URL: <http://www.herecast.com>. Última visita: Abril del 2009.
- [Htc09] Teléfono Móvil HTC Diamond Touch. URL:

- <http://www.htc.com/www/product/touchdiamond/overview.html>. Última visita: Noviembre del 2009.
- [Jac06] Jackson, J. D., Callahan, D. W., and Wang, P. F. Location tracking of test vehicles using accelerometers. In Proceedings of the 5th WSEAS international Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing. In G. R. Dattatreya (Ed). World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, pp. 333-336. Dallas, Texas, November 01 - 03, 2006.
- [Kin06] King, T., Kopf, S., Haenselmann, T., Lubberger, C., and Effelsberg, W. COMPASS: A probabilistic indoor positioning system based on 802.11 and digital compasses. In Proceedings of the 1st international Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization. WiNTECH '06. ACM Press, pp. 34-40. Los Angeles, CA, USA, September 29 - 29, 2006.
- [Lad02] Ladd, A. M., Bekris, K. E., Rudys, A., Marceau, G., Kavraki, L. E., Wallach, D. S. Robotics-based location sensing using wireless ethernet. In Proceedings of the 8th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'02). ACM Press, pp. 227-238. Atlanta, Georgia, USA, September 23 - 28, 2002.
- [Lsp09] Luminant Software Pedometer. <http://luminantsoftware.com/> .Última visita: Junio del 2009.
- [Ncf06] Building a Wi-Fi Discovery Application with the .NET Compact Framework 2.0, URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa446491.aspx>. Última visita: Noviembre 2009.
- [Ocf09] OpenNETCF. URL: <http://www.opennetcf.com/Products/SmartDeviceFramework/tabid/65/Default.aspx>. Última visita: Noviembre del 2009.
- [Pfs08] Ofstad, A., Nicholas, E., Szcodronski, R., and Choudhury, R. AAMPL: accelerometer augmented mobile phone localization. In Proceedings of the First ACM international Workshop on Mobile Entity Localization and

Tracking in Gps-Less Environments. MELT'08. ACM Press, pp. 13-18. San Francisco, California, USA, September 19 - 19, 2008.

- [Pla06] PlaceLab. URL: <http://www.placelab.org>. Última visita: Abril del 2009.
- [Sei07] Seifert, K., Camacho, O. Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers.  
URL:[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3397.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3397.pdf).  
1997.
- [Sky09] SkyHook. URL: <http://www.skyhookwireless.com>. Última visita: Abril del 2009.
- [Wil09] Wilson, J., Patwari, N. Through-Wall Motion Tracking Using Variance-Based Radio Tomography Networks. Tech report on (October 2009). URL: <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:0909.5417>. Última visita: Enero del 2010
- [Wm609] Windows Mobile 6 Professional and Standard Software Development Kits Refresh. URL: <http://www.microsoft.com/downloads/details.aspx?FamilyID=06111A3A-A651-4745-88EF-3D48091A390B&displaylang=en>. Última visita: Noviembre del 2009.
- [Wnp09] Walk 'n Play. <http://www.cpl.uh.edu/projects/walk-n-play>. Última visita: Junio del 2009
- [You04] Youssef, M., and Agrawala, A. On the Optimality of WLAN Location Determination Systems. In Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference (January 2004).
- [You05] Youssef, M. and Agrawala, A. The Horus WLAN location determination system. In Proceedings of the 3rd international Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'05). ACM Press, pp. 205-218. Seattle, Washington, June 06 - 08, 2005.

**Anexo A: Tablas de valores asociados a las figuras 5 y 6.**

Metros	Intensidad Instantánea	Promedio	Promedio Ponderado
1	-52,8	-52,9	-51,9
2	-55,0	-54,9	-53,8
3	-63,4	-66,7	-65,0
4	-66,6	-66,2	-65,4
5	-63,4	-63,2	-64,3
7	-68,7	-69,1	-68,6
9	-66,4	-65,2	-64,9
11	-75,3	-71,8	-72,0
13	-69,8	-71,8	-71,3
15	-73,3	-73,6	-73,5

Figura A.1 – Tabla de valores promedio de la intensidad de señal para los tres tipos de estimación de señal a distintas distancias

Metros	Intensidad Instantánea	Promedio	Promedio Ponderado
1	3,4	1,4	2,7
2	3,0	2,7	2,6
3	3,8	3,3	2,6
4	2,7	1,1	2,2
5	4,6	1,7	3,5
7	2,8	2,3	2,1
9	3,6	1,3	1,5
11	3,5	1,1	1,8
13	4,8	0,7	1,8
15	2,9	0,8	1,2

Figura A.2 – Tabla de desviaciones estándar para los valores promedio de la intensidad de señal para los tres tipos de estimación de señal a distintas distancias