

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

**Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones**



TRABAJO DE DIPLOMA

“Algoritmos para la localización de personas en entornos cerrados”

Autor: Erik Ortiz Guerra

Tutor: MSc. Samuel Montejo Sánchez

Santa Clara

2008

“Año 50 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

**Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones**



TRABAJO DE DIPLOMA

“Algoritmos para la localización de personas en entornos cerrados”

Autor: Erik Ortiz Guerra

E-mail: erik@uclv.edu.cu

Tutor: MSc. Samuel Montejo Sánchez

Prof. Dpto. de Electrónica y Telecomunicaciones

Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV.

E-mail: montejo@uclv.edu.cu

Santa Clara

2008

“Año 50 de la Revolución”



Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Telecomunicaciones y Electrónica autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Dpto
Donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico- Técnica

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por estar siempre el tanto de mi educación, en especial a mis padres y mis tíos.

A mi tutor Samuel Montejo, por su disposición y dedicación durante la realización de este trabajo.

A todos los que, durante toda mi trayectoria de estudiante, contribuyeron a mi educación en especial a los profesores del departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la UCLV.

DEDICATORIA

A mis padres, por poner siempre mi educación por encima de todo.

A mi tío Roddy, por su incondicional apoyo..

TAREA TÉCNICA.

1. Determinar cuáles son las principales prestaciones y utilidades de los sistemas de localización en interiores.
2. Estudiar los algoritmos existentes para la localización en entornos interiores.
3. Analizar cómo varían estos algoritmos en función de la tecnología o infraestructura empleada.
4. Definir las posibles situaciones que pondrán en peligro la robustez y confiabilidad del algoritmo a diseñar.
5. Diseñar un algoritmo de localización de personas para entornos cerrados.
6. Comprobar la ejecución del algoritmo y verificar la compatibilidad entre las reglas planteadas.
7. Documentar la investigación y el diseño del algoritmo.

RESUMEN

El incremento de los servicios basados en localización ha propiciado el desarrollo de sistemas de localización y posicionamiento cada vez más precisos y eficientes, capaces de sustentar gran cantidad de aplicaciones. La incapacidad de los sistemas de localización globales para el desarrollo de aplicaciones en entornos interiores ha llevado al surgimiento de una nueva rama de investigación: los sistemas de localización en interiores.

En el presente trabajo se recogen las características y clasificación de los sistemas de localización en interiores, las tecnologías que pueden ser empleadas y las soluciones implementadas hasta el momento. Son descritos y clasificados algunos de los algoritmos que han sido empleados en diferentes escenarios para la localización en interiores y finalmente contiene el diseño de un algoritmo para la localización de personas en estos entornos que toma en cuenta el comportamiento del individuo para mejorar la precisión y fiabilidad de estos sistemas.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES. TECNOLOGÍAS EMPLEADAS	4
1.1 Clasificación de los sistemas de localización en interiores	4
1.1.1 Según la movilidad de los objetivos a ubicar	4
1.1.2 Según la información que brinda	4
1.1.3 Según la disposición del procesamiento	5
1.1.4 Según la variable medida	5
1.1.5 Según el algoritmo empleado	6
1.1.6 Según la tecnología empleada	6
1.2 Características de los sistemas de localización en interiores	6
1.2.1 Disponibilidad	7
1.2.2 Precisión	7
1.2.3 Latencia	7
1.2.4 Respuesta en tiempo real	7
1.2.5 Robustez	7
1.2.6 Granularidad	8
1.2.7 Capacidad de comunicación	8
1.3 Tecnologías de radiofrecuencia para la localización en interiores	8
1.3.1 Identificación por radiofrecuencia	8
1.3.2 802.11 LAN/MAN Wíreless LANS	9
1.3.3 Redes WPAN	10
1.3.3.1 Bluetooth (802.15.1)	10
1.3.3.2 802.15.3 y 802.15.4	11
1.4 Soluciones de radiofrecuencia implementadas	11
1.5 Conclusiones parciales del capítulo	12
CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES	13

2.1 Métodos de localización.....	13
2.1.1 Identificación por celda:.....	13
2.1.2 Ángulo de llegada:	14
2.1.3 Potencia de la señal recibida	15
2.1.4 Métodos basados en tiempo	16
2.2 Algoritmos de localización.....	17
2.2.1 Algoritmos Matemáticos.....	17
2.2.1.1 Triangulación Circular.....	18
2.2.1.2 Triangulación hiperbólica.....	19
2.2.1.3 Triangulación rectangular	19
2.2.2 Algoritmos probabilísticos.....	20
2.2.2.1 Enfoque bayesiano.....	21
2.2.2.2 Localización de Monte Carlo.....	22
2.2.3 Algoritmos inteligentes	24
2.2.3.1 Algoritmo de los K vecinos más cercanos.....	24
2.2.3.2 Algoritmo fuzzy.....	24
2.2.4 Algoritmos comparativos.....	25
2.3 Conclusiones parciales del capítulo	26
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL ALGORITMO.....	27
3.1 Características y clasificación del algoritmo a diseñar.....	27
3.2 Algoritmo empleado.....	27
3.3 Técnica inteligente utilizada.....	28
3.4 Variables que debe tener en cuenta el sistema experto.	29
3.5 Aspectos a tener en cuenta para el diseño del algoritmo.....	30
3.6 Algoritmo diseñado	31
3.7 Criterios empleados en las comparaciones.....	37
3.8 Fase inicial.....	37
3.9 Actualización de los valores de probabilidad.....	38
3.10 Software para la implementación	38
3.11 Resultados de las pruebas realizadas.....	39
3.12 Conclusiones parciales del capítulo.....	40

CONCLUSIONES.....	41
RECOMENDACIONES.....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
GLOSARIO DE TÉRMINOS	46
ANEXO 1: SISTEMAS EXPERTOS.....	47
ANEXO 2: SOFTWARE WUCSHELL.....	49
ANEXO 3: PROGRAMA DESARROLLADO	51

INTRODUCCIÓN.

Conocer su ubicación ha sido de gran importancia para los hombres desde tiempos remotos, y como resultado de ello durante el transcurso de los años fueron desarrollados diferentes métodos que permitían la navegación marítima o terrestre empleando cuerpos celestes para estimar los puntos cardinales, la posición o el recorrido a seguir.

Durante el siglo XX, con los adelantos de la electrónica y las telecomunicaciones fueron desarrolladas tecnologías para la localización global permitiendo el desarrollo de una gran variedad de aplicaciones que van desde la navegación aérea, marítima o terrestre hasta el seguimiento de objetivos móviles con fines militares y civiles

El sistema de posicionamiento global (GPS) constituye, sin lugar a dudas, el sistema de localización más difundido en nuestros días y aunque en sus inicios fue desarrollado con fines bélicos, su uso en aplicaciones civiles a partir de 1995 marcó el comienzo de una era donde los servicios basados en localización tienen un lugar privilegiado.

La gran variedad e incremento de estos servicios ha propiciado el desarrollo de sistemas de localización y posicionamiento cada vez más exactos y fiables. El funcionamiento, precisión y aplicabilidad de los sistemas globales ha resultado insuficiente para aplicaciones en entornos cerrados o interiores debido, fundamentalmente, a los cambios que se producen en las características de propagación de las señales empleadas por estos sistemas.

Es por ello que para entornos cerrados o interiores las técnicas de ubicación y posicionamiento deben ser desarrolladas teniendo en cuenta las características de estos escenarios así como las principales situaciones presentes en ellos y las necesidades de la aplicación final.

El presente trabajo está motivado por las prometedoras aplicaciones de los sistemas de localización en interiores y la búsqueda de soluciones que permitan el desarrollo de sistemas fiables y precisos.

Las utilidades de estos sistemas son amplias y sus áreas de aplicación varían desde un hospital hasta instalaciones hoteleras; entre sus principales ramas de aplicación pueden ser mencionados: espacios de trabajo inteligentes; ubicación de personal en hospitales, para permitir tras la localización la gestión ágil de una emergencia o para restringir a los pacientes en determinadas áreas; control de acceso en edificaciones, espacios o secciones

dentro de ellas; rescate de personal en incendios u otras catástrofes minimizando el riesgo de los rescatistas; para facilitar la navegación de robots o el seguimiento de personas u objetivos móviles.

Los principales esfuerzos en esta área actualmente están encaminados al estudio de algoritmos que permitan la localización del objetivo de manera ágil y precisa y para ello han sido desarrolladas diversas variantes que permiten estimar la posición de los objetivos logrando precisiones acertadas que varían de una aplicación a otra.

Este trabajo centra sus objetivos en el diseño de un algoritmo de localización de personas en entornos interiores y con su culminación los programadores de aplicaciones tendrán a su disposición un algoritmo de localización de personas, con la principal virtud de tomar en cuenta el comportamiento del objetivo a ubicar. Además los conceptos en él manejados contribuirán al desarrollo de otros sistemas para su aplicación en diferentes situaciones. También permitirá a otros autores la confrontación y comparación con soluciones similares.

Objetivo general.

Diseñar un algoritmo de localización que permita determinar la posición de personas en entornos cerrados.

Objetivos específicos.

1. Estudiar los conceptos fundamentales sobre los sistemas de localización.
2. Analizar algunas de las soluciones dadas al problema hasta el momento con el objetivo de identificar puntos en común con la presente investigación.
3. Discutir hasta qué punto los algoritmos estudiados pueden dar solución al problema planteado en esta investigación con el principal objetivo de encontrar las fortalezas y debilidades de estos sistemas.
4. Analizar cuales serían los principales rasgos, situaciones y características de un sistema de localización en entornos cerrados.
5. Diseñar un algoritmo de localización de personas para entornos cerrados.
6. Verificar el funcionamiento del algoritmo diseñado con el objetivo de evitar la existencia de incongruencias o ambigüedades.

Estructura del trabajo.

El informe será estructurado en introducción, capitulo, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

Introducción.

Se recogerá la importancia, necesidad y objetivos de la realización de la investigación.

Capítulo 1.

Análisis del estado del arte de los sistemas de localización clasificación y caracterización de estos sistemas y descripción de los sistemas existentes hasta la fecha.

Capítulo 2.

Descripción de los distintos métodos y algoritmos para determinar ubicación y posicionamiento en interiores, estudio y análisis de las variantes que pueden ser utilizadas para la localización en interiores.

Capítulo 3.

Características que debe tener el sistema para la localización de personas en interiores, realizando un conjunto de descripciones que permitan completar los rasgos del algoritmo.

Diseño del algoritmo de localización para entornos cerrados y descripción de su funcionamiento; así como resultados de las pruebas realizadas.

Conclusiones.

Valoración de los resultados obtenidos, dejando claro las posibles limitaciones y deficiencias del sistema así como las recomendaciones para su empleo.

Recomendaciones.

Se hará teniendo en cuenta aquellos puntos que puedan enriquecer el trabajo, tomando en consideración los temas que no fueron descritos en la investigación por su extensión o por no ajustarse al tema planteado.

Referencias bibliográficas.

Se hará un listado de las referencias bibliográficas consultadas siguiendo las normas establecidas para ello.

Anexos.

Se incluirán aquellos temas que son de vital importancia para el trabajo y requieran ser tratados en el mismo aunque no estén directamente relacionados con el tema estudiado.

CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES. TECNOLOGÍAS EMPLEADAS.

Para el análisis de los sistemas de localización en interiores es imprescindible la correcta clasificación y caracterización de los mismos tomando en consideración los distintos criterios existentes que definen su funcionamiento y requerimientos.

1.1 Clasificación de los sistemas de localización en interiores.

Los sistemas de localización en interiores pueden ser clasificados de diferentes maneras y los criterios para ello varían de un autor a otro. Este trabajo realiza una clasificación tomando en cuenta los aspectos que se han considerado como significativos para la definición de dichos sistemas, los cuales son referidos a continuación:

1.1.1 Según la movilidad de los objetivos a ubicar.

Los objetivos pueden ser móviles o fijos. En el caso de objetivos móviles es importante tener en cuenta si se trata de personas, robots, u otros dispositivos debido a que los métodos a emplear difieren en cada caso, por ejemplo: para un robot, además de conocer su ubicación es importante saber de qué manera está dispuesto en su posición para definir hacia donde está el frente o simplemente qué tiene en frente, situación que carece de interés en aplicaciones donde los objetivos a ubicar son personas.

Los objetivos fijos son aquellos que cambian su posición por la intervención del hombre y la localización de los mismos tiene sentido en el caso de almacenes, para realizar inventarios o para comercializar productos, situaciones en las que el empleo de un sistema de localización contribuiría al correcto desempeño de estas labores y agilizaría las mismas.

1.1.2 Según la información que brinda.

Existen dos formas o clases de presentar la información de ubicación: física o simbólica.

La localización física brinda la información en coordenadas; por ejemplo: latitud, longitud y elevación, como el caso de GPS; sin embargo la simbólica reúne ideas abstractas que sitúan al dispositivo en la cocina o en un barco en el Atlántico; los sistemas pueden también reunir ambas clases y usar localizaciones físicas para determinar un conjunto de información simbólica (Gómez, 2005).

Estos criterios están estrechamente relacionados con la localización por coordenadas o por celdas; en la primera la información de ubicación puede tomar como referencia objetos de los cuales se conoce su ubicación y en función de ellos sitúa al objeto en cuestión, por ejemplo: *un dispositivo está frente a la puerta y a 5 metros de la mesa*. La localización por celda mantiene la idea de la abstracción y ubica al dispositivo en un área determinada que puede estar delimitada, entre otros, por el radio de cobertura de los sensores.

1.1.3 Según la disposición del procesamiento.

Los sistemas pueden ser centralizados o distribuidos en cuanto al lugar donde se realiza el procesamiento de los datos y su selección depende de la aplicación en particular.

Los sistemas centralizados son aquellos donde la información se maneja por uno o más nodos de la red que están especializados en ello y el resto de los dispositivos puede o no conocer el resultado de su ubicación.

Los sistemas distribuidos son aquellos en los cuales la ubicación es determinada por el propio dispositivo, es decir, se realiza de manera autónoma y su principal ventaja radica en que varios dispositivos pueden estar determinando su ubicación simultáneamente.

En un sistema centralizado el manejo de la información puede llegar a ser un problema cuando la cantidad de la misma comienza a crecer, sin embargo una ventaja importante sería la sencillez del dispositivo a ubicar.

En sistemas distribuidos los dispositivos a ubicar son capaces de realizar los cálculos necesarios para determinar su posición. Su uso está justificado cuando los mismos realizan otras tareas para las cuales es necesario el procesamiento de datos, constituyendo así dispositivos multitarea donde una de ellas es determinar su posición.

1.1.4 Según la variable medida.

Puede ser medido el tiempo, la potencia o amplitud de la señal. Las más comúnmente usadas son: medida de rangos por tiempos de vuelo: TOA, TDOA; medida de ángulos, AOA; medida aproximada de rangos por intensidad o potencia de la señal recibida, RSSI; medida de proximidad, donde se mide si está o no dentro de un rango fijo de cobertura, pero no se estima a qué distancia.

1.1.5 Según el algoritmo empleado.

Para la ubicación de manera precisa algunos sistemas de localización recogen información de varias fuentes (sensores, detectores) y empleando algoritmos matemáticos, probabilísticos o inteligentes determinan la posición del dispositivo.

Entre los algoritmos matemáticos más empleados tenemos: trilateración y triangulación; los probabilísticos pueden ser con o sin muestreo y las técnicas inteligentes se basan en métodos de inteligencia artificial y podemos mencionar; redes neuronales, conjuntos borrosos y algoritmos genéticos. Los requerimientos de precisión así como las principales necesidades y características de la aplicación, definen la técnica a utilizar.

1.1.6 Según la tecnología empleada.

Existen tres grandes grupos que pueden clasificar estos sistemas: ultrasónicos, ópticos y radiofrecuencia.

Las tecnologías ultrasónicas y ópticas son las menos difundidas en la actualidad y su uso está destinado fundamentalmente a aplicaciones para determinar presencia, siendo su área más común de aplicación la implementación de alarmas contra robos. Sin embargo existen técnicas que permiten, a partir de ellas, la localización con una precisión acertada y en muchos casos se utilizan técnicas híbridas con el objetivo de mejorar las prestaciones de estos sistemas, un ejemplo de ello lo constituye el sistema Cricket descrito por Bodhi (Priyantha, 2005). En el epígrafe 1.3 se describen algunas de las variantes de la tecnología de radiofrecuencia por ser la más empleada para la localización en entornos interiores.

1.2 Características de los sistemas de localización en interiores.

En el diseño de un sistema de localización es importante plantearse interrogantes como: ¿Es necesario que se determinen distancias entre objetos? ¿Qué tipo de localización se necesita, por coordenadas o por celdas? ¿Existen dispositivos fijos cuya posición es conocida, pueden ser empleados como referencia en el sistema?; de tratarse de identificación por celda: ¿Cuál es el tamaño de la celda mínima de localización? ¿Es suficiente con ubicar el dispositivo en un local? La respuesta a interrogantes como estas caracterizará el sistema a diseñar y permitirá seleccionar la tecnología y algoritmo a emplear.

Para elegir entre las diferentes opciones disponibles para la localización en interiores, es necesario considerar qué características ha de satisfacer el sistema. La disponibilidad, la

precisión, la latencia, la respuesta en tiempo real, la robustez, la granularidad y la capacidad de comunicación son algunos de los factores que es necesario tener en cuenta (Barbolla et al., 2005).

1.2.1 Disponibilidad.

Cualidad o condición de disponible, referida al tiempo que la aplicación está en servicio, en muchas ocasiones es expresada como el por ciento del tiempo que la misma está fuera de operación.

1.2.2 Precisión.

Se refiere al error máximo permisible por la aplicación entre la posición estimada y la posición real del objetivo. Los requerimientos de precisión varían en función de la aplicación y puede existir un sistema donde el error cometido sea de algunos metros (GPS) sin embargo en otros casos; por ejemplo en un robot, la precisión del sistema debe quedar reducida a pocos centímetros para facilitar la navegación del mismo.

1.2.3 Latencia.

Siempre es una medida de demora que en estos sistemas puede ser interpretada como: el tiempo que pasa desde que una persona o dispositivo se mueve hasta que el sistema conoce de dicho movimiento y lo representa en la interfaz implementada para la aplicación.

1.2.4 Respuesta en tiempo real.

Pretende minimizar el intervalo de tiempo en el que se desconoce la ubicación del objetivo, está relacionada con la frecuencia de muestreo y su selección depende de los métodos y técnicas aplicadas para determinar la posición en cada momento. También influye en la selección de esta frecuencia, el tiempo en que el dispositivo a ubicar cambia de una posible ubicación a otra: velocidad de movimiento.

1.2.5 Robustez.

Expresa la capacidad del sistema de solucionar el problema planteado, la localización, en todo momento y está estrechamente relacionado con la probabilidad del sistema de bloquearse o congestionarse en determinado momento.

1.2.6 Granularidad.

Expresa la posibilidad del sistema de poder discernir entre dos o más dispositivos que se encuentren cercanos entre sí y que sus datos de ubicación sean recogidos por los mismos sensores, además expresa la capacidad del sistema de presentar la información de localización y algunos autores como Jiménez (Jiménez et al., 2005), relacionan esta característica con la localización física o simbólica.

1.2.7 Capacidad de comunicación.

Capacidad de los dispositivos de intercambiar información predeterminada, entre ellos y/o con el nodo central, a través de protocolos de comunicación.

1.3 Tecnologías de radiofrecuencia para la localización en interiores.

RFID, Bluetooth, UWB, y Wi-fi son algunas de las tecnologías más empleadas para la localización en entornos interiores y espacios acotados. En la actualidad existen proveedores que brindan soluciones comerciales para propósitos de localización en estos entornos con dichas tecnologías; es por ello que las secciones siguientes están dedicadas a describir brevemente cada una de ellas.

1.3.1 Identificación por radiofrecuencia.

Esta tecnología tiene sus orígenes en los años 1940 durante la II Guerra Mundial y fue empleado por el ejército Inglés para distinguir sus aviones de los del enemigo (Barbolla et al., 2005, Shepard, 2004). Un sistema RFID consiste en etiquetas (tags), lectores (readers), y un sistema de control centralizado (Barbolla et al., 2005).

Las etiquetas permiten al sistema identificar su portador; éstas pueden ser pasivas (se activan al recibir la señal proveniente del lector, poseen bajo costo y gran tiempo de vida útil) o activas (con batería incluida brindándole un mayor rango de cobertura) (Shepard, 2004).

La localización con RFID se realiza por celda por lo que, teniendo en cuenta el rango de cobertura, con las etiquetas pasivas se pueden obtener resultados más precisos y el uso de las etiquetas activas puede brindar buenos resultados cuando el entorno de aplicación es un espacio de mayor tamaño.

Los lectores son dispositivos fijos que permiten leer y decodificar la información contenida en las etiquetas a través de señales de radiofrecuencia y enviarla a un sistema gestor para ser procesada y almacenada.

Las principales limitaciones de esta tecnología radican en la existencia de colisiones, que pueden producirse de dos maneras: entre etiquetas o entre lectores. Las colisiones entre etiquetas se producen cuando un lector posee en su rango de cobertura más de una etiqueta por lo que al interrogar todas responden a la vez causando una pérdida de la información. Este problema se resuelve encuestando las etiquetas una a una mientras el resto permanece en stand by, este proceso debe ser rápido pues define el número máximo de etiquetas por segundo que el lector es capaz de procesar.

El segundo problema es más complejo y se produce por la interferencia que puede producir un lector sobre otro al tener en algún punto de su cobertura un área común, una vía para solucionar este problema sería propiciar que los lectores estuvieran totalmente aislados uno de otro pero esto además de ser en extremo difícil, causaría la presencia de zonas sin cobertura (zonas de silencio) que sería perjudicial para el correcto funcionamiento del sistema.

Otra posibilidad sería utilizar FDM y asignar a cada lector una frecuencia de operación, pero entonces existirían etiquetas duplicadas debido a que, por su sencillez, estas no son capaces de identificar el lector que las interroga. Los principales esfuerzos actualmente están encaminados a la solución de estos problemas, que pueden ser combatidos desde la aplicación que hace uso de esta tecnología.

1.3.2 802.11 LAN/MAN Wireless LANS.

El estándar IEEE 802.11 o WiFi es un estándar de protocolo de comunicaciones de la IEEE. El estándar original data de 1997 soportando velocidades de 1 hasta 2Mbps y trabajaba en la banda de frecuencia de 2.4 GHz (Barbolla et al., 2005).

Posteriormente este estándar se ha desarrollado y actualmente esta tecnología ha sido normalizada por la IEEE con bajo los estándares 802.11a/b/g/i/j/h/e.

Las aplicaciones de la tecnología WiFi son muy variadas (redes de datos inalámbricas, vigilancia, telefonía.) pero sin duda actualmente están tomando una posición más relevante las aplicaciones relacionadas con la localización.

El mecanismo de posicionamiento basado en redes WiFi o redes inalámbricas se basa en las mediciones que los puntos de acceso de la red hacen de la potencia y de la SNR de las emisiones transmitidas por los dispositivos inalámbricos que se conectan a la red (Carcadilla, 2006, Savi). De esta manera utilizando diferentes métodos y la información recibida por tres o más puntos de acceso el sistema puede determinar la posición del dispositivo debido a que la ubicación de los puntos de acceso es conocida.

1.3.3 Redes WPAN.

La IEEE ha desarrollado estándares para WPAN bajo el estándar 802.15, que permite la conectividad inalámbrica entre estaciones y sus características han propiciado el desarrollo de diferentes variantes de este estándar que permiten la implementación de sistemas de localización, en las secciones siguientes serán brevemente descritos algunos de ellos.

1.3.3.1 Bluetooth (802.15.1).

Bluetooth es una tecnología diseñada para ofrecer conectividad a redes personales mediante dispositivos móviles, de forma económica. Esta tecnología está respaldada por grandes fabricantes (Agere, Ericsson, IBM, Intel, Microsoft, Motorola, Nokia, Toshiba), que conformaron en 1999 el grupo especial interesado en Bluetooth (Bluetooth Special Interest Group).

Bluetooth, permite conectar múltiples dispositivos (portátiles, PDAs, teléfonos móviles), formando piconets, y posibilita la conexión a una LAN o WAN a través de un punto de acceso. Opera en un rango de frecuencias abierto, la conocida banda ISM, entre 2,402 y 2,480 GHz.

Aunque Bluetooth no fue concebida como una tecnología de localización, por sus características puede ser empleado para ello. Una variante es instalar un punto de acceso en cada zona del área a cubrir, para llevar a cabo una identificación por celda convencional.

La segunda variante, puede localizar en dos dimensiones. Los puntos de acceso se colocan más distanciados unos de otros, normalmente cada 10 ó 15 metros. Para cada dispositivo se mide la distancia a diferentes puntos de acceso y posteriormente se triangula, utilizando el método de potencia de la señal recibida.

1.3.3.2 802.15.3 y 802.15.4.

Para brindar altas tasas de transferencia en redes WPAN se desarrolló el 802.15.3a que define como nivel físico la transmisión de señales UWB (Mandke et al., 2003).

Una señal UWB ocupa al menos 500MHz de ancho de banda, en un intervalo del espectro electromagnético comprendido entre 3.1GHz y 10.6GHz y con una pequeña potencia de transmisión y su uso fue aprobado por la FCC en el año 2003.

UWB utiliza señales de radiofrecuencia constituidas por pulsos de poca duración, generalmente del orden de nanosegundos (ns) que se traducen en el dominio de la frecuencia en un espectro de gran ancho de banda.

Otras de las versiones del estándar 802.15 ofrecen menores tasas de transferencia que el 802.15.3; el 802.15.4 o ZigBee, como se le conoce comercialmente, constituye una tecnología de bajo consumo y costo, su rango de operación es entre 10 y 75 metros y sus áreas de aplicación coinciden con Bluetooth. (Ergen, 2004)

El 802.15.4a también define como nivel físico las señales UWB y entre sus aplicaciones está la localización y rastreo de personas, niños u objetos móviles; entre sus principales características está, una razón de transferencia entre 1 y 10 Kbps con un rango máximo de 30 metros y un consumo de potencia menor de 1mW (August, 2004, Sahinoglu and Gezici, 2006).

Un sistema de localización con esta tecnología sería sumamente preciso (del orden de centímetros) pues dado que son transmitidos pulsos cortos el error en calcular el tiempo de vuelo sería bien pequeño, además los rangos de cobertura son pequeños por lo que un sistema de este tipo puede ser capaz de tener ubicado con gran precisión un objetivo, sin embargo si el objetivo a ubicar puede estar en algún momento fuera del área de cobertura entonces sería necesario la utilización de más dispositivos UWB lo que traería consigo la presencia de gran número de zonas de silencio o interferencias entre dispositivos que pueden deteriorar el desempeño del sistema.

1.4 Soluciones de radiofrecuencia implementadas.

Existe dentro de las tecnologías de radio frecuencia diversidad de soluciones al problema de la localización, es por ello que se considera oportuno describir brevemente algunas de las soluciones implementadas para estos fines.

Basado en el estándar IEEE 802.11 un grupo de investigadores de Microsoft desarrolló un sistema que utiliza la intensidad de la señal recibida a dos puntos de acceso para estimar la posición en 2D. El MSR RADAR obtiene precisiones de 4 metros (Bahl and Padmanabhan, 2000, Sánchez, 2005, Priyantha, 2005) las principales limitaciones de este método radica en la localización 3D debido a que las atenuaciones y reflexiones que se producen al atravesar la señal las diferentes plantas producen errores considerables en las mediciones de distancia; para mejorar esto se crean bases de datos donde se recogen la amplitud de la señal obtenida en distintos puntos de la edificación para luego, a partir de las huellas de la señal recibida, deducir la posición con mayor precisión.

Otro sistema desarrollado es PinPoint 3D-iD que se basa en estaciones base y etiquetas activas RFID (Jiménez et al., 2005, Sánchez, 2005) las cuales son encuestadas secuencialmente y las estimaciones de distancias se realizan a partir del tiempo de ida y vuelta de la señal. La principal limitación de este sistema es que las antenas tienen un rango de cobertura pequeño y son muy directivas por lo que es necesario un gran despliegue de infraestructura para cubrir un área determinada.

El sistema UWB Ubisense utiliza la tecnología UWB y logra precisiones de 20cm (Jiménez et al., 2005, Priyantha, 2005) con un alcance de 50 metros, la localización se realiza bajo demanda y el dispositivo a ubicar emite ráfagas UWB sin codificar, la ventaja fundamental de este sistema se debe a su gran alcance, minimizando la infraestructura a emplear.

1.5 Conclusiones parciales del capítulo.

A pesar de no existir hasta el momento ninguna variante tecnológica que permita la localización óptima para todos los entornos y aplicaciones en interiores, sí es posible encontrar variantes que satisfagan en un alto grado las necesidades de localización con fines específicos. Es por ello que resulta imprescindible, la comprensión a cabalidad de las necesidades del servicio a brindar, para poder clasificar de forma precisa al sistema de localización a emplear. Determinar los requerimientos mínimos de dichos sistemas, así como la tecnología y métodos a utilizar, representa la clave para una localización rápida y precisa del objetivo en cuestión.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES.

Un sistema de localización está formado por tecnologías, métodos y algoritmos que le permiten el desarrollo de su función (la localización) y aunque la localización global y la localización en interiores difieren mucho en diferentes aspectos como precisión, robustez, alcance, tecnología; existen características que se manifiestan en ambos y en sentido general los métodos y técnicas son semejantes.

Es importante en este momento realizar un análisis de lo que podemos catalogar como métodos y algoritmos de localización así como las principales diferencias entre ambos conceptos.

Métodos: Un método es un procedimiento o hábito, que es seguido con el objetivo de obtener un resultado confiable y seguro. De la aplicación de un método de localización no siempre se obtiene, de manera directa, la ubicación del dispositivo móvil y se requiere de la realización de otros pasos (algoritmos) para determinar la posición, su utilización es de suma importancia para muchas aplicaciones pues de ellos se obtienen medidas de distancias, ángulos o estadísticas que permiten a los algoritmos la correcta realización de su función. Algunos autores como Jiménez (Jiménez et al., 2005) identifican este concepto como técnicas de localización y dentro de ellas lo clasifican desde el punto de vista de la variable medida; es por ello que a partir de este momento los conceptos de método y técnica estarán estrechamente ligados pues consideramos que ambos son acertados y sus diferencias radican en el enfoque de cada autor.

Algoritmos: Un algoritmo es un conjunto de secuencias ordenadas que permiten la obtención de un resultado concreto y fiable. Por tanto la aplicación de un algoritmo de localización dará como resultado la posición del dispositivo a ubicar y según sea su desempeño, robustez y eficiencia el resultado será más o menos preciso.

2.1 Métodos de localización.

2.1.1 Identificación por celda.

En el método de localización por celda (Cell Global Identity o Cell Identification), también conocido como método por punto de acceso para el caso de redes WLAN y WPAN, la

posición se obtiene directamente en función de la identidad de la celda o punto de acceso que da cobertura al área en el que se encuentra el terminal móvil (Barbolla et al., 2005). Es el método más inmediato, pues está disponible sin realizar ninguna inversión ni modificación en red o terminal. La precisión de este método depende del radio de cobertura del sensor empleado que a su vez define el radio máximo de la celda. Este método es el más simple y como resultado de su aplicación se obtiene directamente la ubicación del dispositivo deseado pero a su vez es el menos preciso y el error máximo cometido es igual al radio de la celda de identificación.

2.1.2 Ángulo de llegada.

El método de ángulo de llegada AOA o DOA puede ser dividido en dos clases: la que utiliza la respuesta de amplitud de la antena receptora y la que se basa en la respuesta de fase de la antena receptora (Mao et al., 2006).

Para la primera de ellas el patrón de la antena se hace girar mecánica o eléctricamente y la dirección donde la potencia recibida sea máxima, se escoge como la dirección de la antena transmisora, la principal limitante de este método es que si la antena transmisora no es capaz de transmitir con una potencia constante entonces la receptora no podría determinar con efectividad la dirección de la misma; para resolver este problema se puede emplear en lugar de una, dos antenas de las cuales una sería omnidireccional y utilizaría la señal recibida para normalizar la señal obtenida por la antena de patrón giratorio eliminando así el efecto de la variación de la señal recibida (Mao et al., 2006).

La otra clase: respuesta de fase de la antena receptora, emplea un arreglo de antenas para determinar la diferencia de fase de dos elementos adyacentes del arreglo y con ello estimar la distancia a la que se encuentra el transmisor del arreglo de antenas receptoras. Este método pierde efectividad con la presencia de interferencia cocanal o con señales multitrayecto.

En principio, sólo son necesarios dos grupos de antenas para estimar la posición del dispositivo móvil. Por este motivo AOA puede resultar efectivo en entornos rurales, donde es complicado disponer de visión de tres estaciones base al mismo tiempo. En entornos urbanos suele ser imprescindible emplear más estaciones con el fin de obtener mejores resultados.

La precisión de este método está determinada por la directividad de las antenas empleadas y por la presencia de reflexiones que provocan señales multitrayecto, para eliminar el efecto de estas reflexiones son empleados diferentes algoritmos de máxima probabilidad que pueden ser clasificados en deterministas o estocásticos (Mao et al., 2006).

2.1.3 Potencia de la señal recibida.

Este método (RSS) se basa en la pérdida de potencia que la señal sufre debido al medio de propagación (en el caso de espacio libre, la potencia de la señal decae con el cuadrado de la distancia al punto de emisión) (Barbolla et al., 2005). En su versión más sencilla, el método utiliza una medida RSSI, que recoge la potencia con la que llega la señal procedente del dispositivo móvil que se desea localizar a la estación receptora. Mediante la medición de la potencia recibida en una única estación sólo se consigue una estimación de la distancia a la que puede estar el dispositivo. Para calcular la posición es necesario realizar el mismo proceso con tres estaciones, con el fin de triangular a partir de los datos obtenidos. Cuanto más alejado está el objeto que se desea localizar, mayor suele ser el error que se comete al efectuar la medida de la potencia.

Para aumentar la precisión, es necesario trabajar con modelos de propagación avanzados u observar la distribución del campo en el espacio con el fin de complementar la técnica básica. Para ello son utilizados monitores de radiofrecuencia o huellas de potencia (Barbolla et al., 2005):

- *Monitores de radiofrecuencia:* para un punto de acceso es una tarea trivial conocer el nivel de potencia recibida de un dispositivo móvil en su zona de cobertura. Sin embargo, si el punto de acceso ha de realizar medidas en celdas adyacentes (como es necesario para implementar algunas técnicas de localización), durante el proceso se pueden generar errores en aplicaciones de tiempo real: el punto de acceso ha de interrumpir el servicio en su celda, cambiar de canal, escuchar, medir la potencia y volver al canal de origen. Para evitar esta situación, algunos fabricantes han optado por emplear monitores de potencia dedicados exclusivamente a escuchar las señales, de tal forma que descarguen a los puntos de acceso de tener que conmutar de canal.

- *Creación de huellas de potencia.* La huella de potencia se obtiene recorriendo el emplazamiento en el que se desea localizar, y grabando las medidas de potencia en puntos definidos de una retícula (*grid*) que se superpone al espacio físico. Se construye de esta

forma una base de datos con las medidas en posiciones concretas. El sistema puede mejorar notablemente la precisión de la localización, pero también la encarece y, en caso de que se produzcan variaciones en la red o en el entorno, requiere repetir nuevamente el proceso.

2.1.4 Métodos basados en tiempo.

Estos métodos realizan las mediciones en función de parámetros de tiempo relacionados con la propagación de la señal que permiten estimar la distancia a la que se encuentra el objetivo a ubicar.

Basado en tiempo de llegada: TOA utiliza la medida del tiempo de llegada de una señal transmitida por un terminal móvil a diferentes estaciones fijas o viceversa.

En este método es medido el tiempo de propagación de la señal, entre la estación base y el dispositivo móvil, para ello es necesaria una correcta sincronización entre ambas estaciones para poder determinar el tiempo de propagación (Cheung and So, 2005); con esta medición se obtiene la distancia a la que se encuentran el terminal móvil y la estación fija pero para saber exactamente la ubicación es necesario realizar mediciones respecto a dos estaciones fijas más, formando así circunferencias cuyo centro son los terminales fijos y sus radios se corresponden con la distancia estimada por cada uno de ellos; para estimar la posición se emplean entonces técnicas de triangulación circular.

El punto donde se intersectan las tres o más circunferencias es, en el mejor de los casos, la posición del dispositivo, sin embargo debido a que esta estimación no es exacta, las circunferencias no se intersectan en el mismo punto y existe una zona de incertidumbre en la posición del dispositivo, esta zona puede hacerse pequeña empleando un mayor número de terminales fijos.

Basado en diferencia de tiempo de llegada: TDOA utiliza la diferencia entre los tiempos de llegada de la señal procedente del terminal móvil a distintos pares de estaciones fijas para, a partir de estos datos, estimar la posición del objetivo utilizando algoritmos de trilateración. La precisión y la resolución de este método aumentan a medida que se hace mayor la distancia entre las antenas receptoras pues esto causaría un incremento en las diferencias de los tiempos de propagación (Mao et al., 2006). La principal ventaja de este método con relación al anterior (TOA) es que en él sólo es necesaria la sincronización entre las estaciones fijas.

2.2 Algoritmos de localización.

Los algoritmos de localización son los encargados de determinar la ubicación final del objetivo a partir de un conjunto de datos que pueden ser obtenidos en diferentes procesos: estimación de distancias, estimación de dirección tomando como referencia distintos puntos u objetos o analizando datos previamente recogidos.

En el capítulo anterior fueron clasificados los sistemas de localización según el algoritmo que emplean y por este criterio se clasificaron en matemáticos, probabilísticos o inteligentes.

Para cada situación de localización puede ser desarrollado un algoritmo y pueden ser encontrados en la literatura gran cantidad de ellos que se basan en el mismo principio pero que poseen adaptaciones en función de la aplicación en particular, cada uno con sus ventajas y limitaciones, en esta sección presentaremos los que consideramos más significativos y que pueden satisfacer mejor las exigencias planteadas en determinado momento.

2.2.1 Algoritmos Matemáticos.

Los algoritmos matemáticos emplean el cálculo para determinar la ubicación del dispositivo, fundamentalmente la trigonometría y para la realización de estos cálculos utilizan las informaciones de distancias o dirección obtenidas por alguno de los métodos discutidos anteriormente.

Triangulación: es un término originalmente usado en la navegación y toma múltiples puntos de referencia para localizar una posición desconocida.

Esta técnica utiliza las propiedades geométricas de los triángulos para determinar la posición del objetivo y según Gómez (Gómez, 2005) puede ser dividido en lateración y angulación; otros autores como Carcavilla (Carcadilla, 2006) y Crespo (Crespo, 2003) utilizan los términos trilateración y triangulación y lo identifican como dos técnicas individuales.

En cualquiera de los dos enfoques la idea es la misma y la diferencia radica en que con trilateración, se emplean medidas de distancias y con triangulación se emplean medidas de ángulos u orientaciones.

La triangulación puede emplear distintas figuras geométricas para el cálculo y muchos autores han definido diferentes variantes para satisfacer sus necesidades en determinado momento, a continuación serán descritas algunas de ellas.

2.2.1.1 Triangulación Circular.

Esta variante emplea la intersección de circunferencias para determinar la posición del objetivo, el radio de cada circunferencia corresponde con la distancia estimada a la que se encuentra el dispositivo y se forman círculos con centro en los dispositivos fijos; el área de intersección corresponde con la ubicación del dispositivo tal y como se muestra en la figura 2.1.

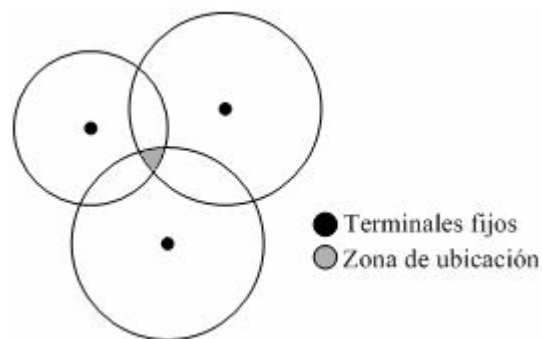


Figura 2.1 Esquema geométrico de la triangulación circular.

Si las estimaciones de distancias estuvieran libres de errores la intersección de las circunferencias sería un punto, quedando así estimada la posición del objetivo sin errores; sin embargo con cualquiera de los métodos que se empleen (TOA, TDOA, RSS o AOA) las estimaciones de distancias no están libres de errores por lo que la intersección de los círculos será una zona, causando una cierta incertidumbre en la información de posición, a pesar de que con tres estaciones fijas es suficiente para conocer la zona de ubicación del dispositivo móvil (Roa et al., 2007) el error de posicionamiento puede disminuirse si se emplean más estaciones fijas que estimen la distancia del objetivo.

Un inconveniente de esta técnica es que la figura que se forma de la intersección de las circunferencias no es una figura geométrica regular, complicando la estructura de datos a utilizar, además como consecuencia de los errores en la estimación de distancias puede ocurrir que las figuras no se intercepten, como se observa en la figura 2.2, lo que causaría una mayor imprecisión en la estimación de posición.

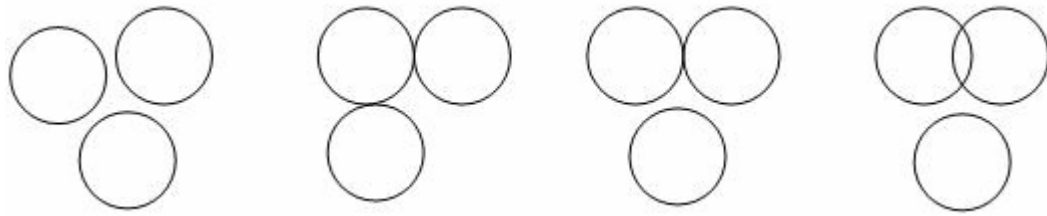


Figura 2.2 Casos que atentan contra la precisión de la triangulación circular.

2.2.1.2 Triangulación hiperbólica.

Esta técnica es muy semejante a la circular y emplea la propiedad de las hipérbolas de tener igual distancia a dos puntos de referencia, la principal diferencia entre ambas es que la hiperbólica utiliza las diferencias de las distancias estimadas por los terminales fijos para resolver un sistema de ecuaciones que le permiten determinar la posición del dispositivo o lo que es lo mismo, la correlación entre las distancias a dos terminales fijos da como resultado una hipérbola y la intersección de las mismas es la posición del dispositivo como se muestra en la figura 2.3.

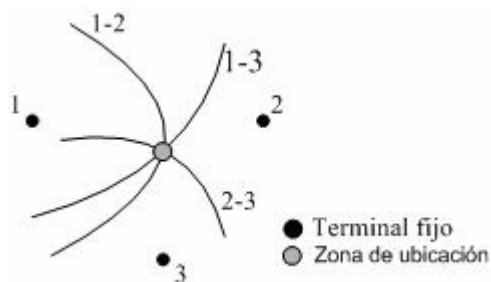


Figura 2.3 Esquema geométrico de la triangulación hiperbólica.

2.2.1.3 Triangulación rectangular.

Esta técnica se basa en la idea de la conectividad y plantea que si el terminal móvil es capaz de comunicarse con el terminal fijo entonces el objetivo a ubicar se encuentra dentro de un cuadrado cuyo centro es el terminal fijo y su lado el doble del radio de cobertura del mismo, de esta manera la intersección de al menos tres cuadrados dará como resultado un

rectángulo, mostrado en la figura 2.4, que sería la posición del objetivo (García et al., 2007).

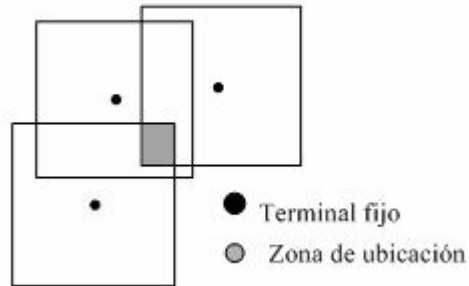


Figura 2.4 Esquema geométrico de la triangulación rectangular.

La principal ventaja de esta técnica es que, como resultado de la intersección, se obtiene una figura regular y para su representación sólo es necesario especificar las esquinas superior e inferior minimizando así la estructura de datos, otra ventaja importante es que se ejecuta de manera distribuida y el dispositivo móvil obtiene la información de su posición a partir de conocer la posición de los terminales fijos correspondientes e intersectar los cuadrados y estima su posición como el centro del rectángulo de intersección.

García (García et al., 2007), describe una técnica que combina la triangulación circular y la rectangular con el objetivo de mejorar la precisión formando polígonos irregulares con los cuales se pueden obtener mejores resultados que si se emplearan circunferencias o rectángulos.

2.2.2 Algoritmos probabilísticos.

Estos algoritmos son muy adecuados para la localización en interiores pues incorporan el manejo de la incertidumbre en las estimaciones de localización (Crespo, 2003). La localización probabilística consiste en determinar la probabilidad de que el objetivo se encuentre en una posición dada una historia de estimaciones o localizaciones y a cada posible posición se le asocia una probabilidad en función de si es o no la posición actual.

Esta probabilidad se actualiza cada vez que se producen nuevas estimaciones por lo que los datos históricos se enriquecen y con ello la efectividad del algoritmo pero esto también es un inconveniente debido a que se almacena y actualiza la distribución de probabilidades para todas las posibles posiciones lo que requiere de mucho tiempo de cómputo por lo que

el proceso es lento y no escalable a grandes entornos, para minimizar esto se emplean técnicas de muestreo las cuales en lugar de almacenar todas las localizaciones posibles, sólo mantienen un pequeño subconjunto de muestras lo que posibilita agilizar los cálculos de localización.

Las técnicas de muestreo combinan los datos históricos con los actuales para estimar la posición del objetivo y en muchos casos es empleada la regla de Bayes para estos fines.

2.2.2.1 Enfoque bayesiano.

Los algoritmos de localización que emplean un enfoque bayesiano contienen (Cortázar and Sanz, 2005):

- Una distribución a priori de la posición del usuario (creencia o belief) expresada por Guerrero (Guerrero and Ruiz, 2005) y Fox (Fox et al., 2003) como:

$$Bel(X_t) = p(x_t/z_{1:t})$$

donde $p(x_t/z_{1:t})$ representa la probabilidad de estar en la posición x dado una historia de mediciones (z).

- Una medida que sigue una determinada distribución de probabilidad (potencia de la señal recibida, ángulo de llegada u otras variables medidas).
- Una distribución a posteriori (creencia actualizada), relacionada con las posiciones en instantes anteriores.

La distribución a priori refleja la probabilidad del objetivo de encontrarse en cada una de las posibles localizaciones y en un instante inicial estas probabilidades pueden ser equiprobables pero en la medida en que el objetivo cambie de posición estos valores serán actualizados.

A partir de la distribución a posteriori será posible estimar la posición del usuario utilizando; la media, la mediana o la moda; mientras una buena medida de la fiabilidad puede ser el inverso de la varianza.

Para la actualización de la creencia se emplean dos pasos (Fox et al., 2003):

- Predicción: En cada momento la creencia es actualizada empleando la regla

$$Bel^-(x_t) \leftarrow \int p(x_t/x_{t-1})Bel(x_{t-1})dx_{t-1}$$

donde el término $p(x_t/x_{t-1})$ describe el dinamismo del sistema, es llamado modelo de movimiento y expresa donde es más probable que esté el objetivo en el instante actual conociendo su posición anterior; este modelo está fuertemente relacionado con la velocidad de movimiento del objetivo.

- Corrección: Una vez realizada la medición en el instante actual la creencia debe ser actualizada teniendo en cuenta los nuevos datos obtenidos, para ello se emplea:

$$Bel(x_t) \leftarrow \alpha_t p(z_t/x_t) Bel^-(x_t)$$

el término $p(z_t/x_t)$ es llamado modelo perceptual y describe la probabilidad de realizar la medición Z_t dado que el objetivo se encuentra en la posición X_t y está relacionado con las características de los sensores empleados (su posición y error cometido en las lecturas), el valor α es una constante de normalización para evitar que el valor de $Bel(x_t)$ sea mayor que uno.

El modelo perceptual es conocido de antemano sin embargo el modelo de movimiento es diferente para cada objetivo; para mejorar la eficiencia, el sistema puede aprender los parámetros de movimiento de cada objetivo para darle un tratamiento diferenciado en función de sus características de movimiento para ello pueden ser empleados algoritmos inteligentes los cuales serán descritos en la sección siguiente.

La actualización de la creencia es computacionalmente compleja y para ello se emplean técnicas para su estimación, algunas de las cuales son descritas por Gallardo (Gallardo, 1999) y Fox (Fox et al., 2003) y emplean aproximaciones paramétricas o suposiciones de gaussianidad con el objetivo de discretizar o aproximar a distribuciones conocidas los datos asociados a la posición.

Existen otros algoritmos que no realizan estas suposiciones mejorando su desempeño ante las no linealidades y a distribuciones arbitrarias, como por ejemplo el MCL (Monte Carlo Location).

2.2.2.2 Localización de Monte Carlo.

Las técnicas de Monte Carlo son un conjunto de métodos de muestreo estadístico que ha sido desarrollado en los últimos años para representar cualquier distribución con un número reducido de muestras sin perder representatividad.

La idea fundamental del MCL es representar el conocimiento de la posición del usuario mediante un conjunto de muestras (llamadas también partículas) obtenidas de acuerdo a la distribución a posteriori.

Para su implementación se sigue el algoritmo recursivo SIR que es capaz de adaptarse a cualquier distribución, concentra los recursos de cálculo donde son más relevantes y ajustando el número de partículas se puede establecer un compromiso entre fiabilidad y costo computacional.

Este algoritmo recursivo consta de tres etapas fundamentales:

- Se obtienen las muestras de las posiciones actuales a partir de las anteriores y el número de muestras obtenido serán la cantidad de partículas que representan a un usuario (M).
- Se calcula el factor de importancia de cada muestra, que viene dado por la distribución.
- Se muestrea nuevamente para obtener M muestras de manera que la probabilidad de elegir una muestra esté condicionado por su factor de importancia. En este proceso se obtienen bastantes repeticiones de las muestras más importantes que son depuradas al aplicarles el primer paso.

Al final de cada recursión se podrá obtener el valor más probable empleando la media, la mediana o la moda.

Este algoritmo a pesar de tener la capacidad de adaptarse a cualquier distribución tiene sus inconvenientes relacionadas con los procesos de iteración y han sido desarrolladas algunas variantes con el objetivo de mejorar su desempeño.

El método de Localización Dual de Monte Carlo (MCL Dual) invierte el proceso de muestreo generando aleatoriamente las muestras correspondientes a la posición actual a partir de la distribución (Guerrero and Ruiz, 2005), en un segundo paso estimar el antecesor probable y, finalmente, determinar la posición actual. Este algoritmo es ideal para mediciones altamente precisas y su principal limitación es su sensibilidad al ruido en las mediciones.

La alternativa Mixture Monte Carlo pretende heredar las fortalezas de MCL y MCL dual y la idea fundamental es generar cada muestra usando uno de los dos algoritmos de manera aleatoria siendo la probabilidad de elección de uno u otro complementarias.

2.2.3 Algoritmos inteligentes.

Estos algoritmos emplean las ventajas de las técnicas de inteligencia artificial para mejorar la eficiencia y fiabilidad de la localización y utilizan sus características tales como: el aprendizaje, el entrenamiento, la solución basada en casos y el manejo de incertidumbre para resolver los problemas inherentes a la localización.

En las secciones siguientes realizaremos una breve descripción de algunos algoritmos que emplean técnicas inteligentes para resolver el problema de la localización.

2.2.3.1 Algoritmo de los K vecinos más cercanos.

Este algoritmo forma parte de una familia de técnicas de aprendizaje conocida como aprendizaje basado en ejemplos y consiste en memorizar un conjunto de ejemplos presentados en una fase de entrenamiento.

Cuando es necesario estimar la posición, se realiza una medición de la potencia recibida y se compara con los datos recogidos en la fase de entrenamiento, la diferencia de estos valores se denomina distancia y el algoritmo calcula el punto para el cual la suma de los cuadrados de la distancia es mínima, posteriormente se identifican los “vecinos” que poseen distancias idénticas o muy semejantes y a partir de ellos se estima la posición del objetivo (Carcadilla, 2006, Cohen et al., 2005, Gwon et al., 2004). Este algoritmo es aplicado en redes inalámbricas Wi-Fi empleando el método de la potencia de la señal recibida y su principal inconveniente radica en que requiere gran cantidad de puntos de calibración para hacer las comparaciones por lo que la fase de entrenamiento es compleja y además el desempeño del sistema es totalmente dependiente del escenario de aplicación.

2.2.3.2 Algoritmo fuzzy.

Los conjuntos borrosos (o fuzzy) han servido como una de las herramientas para resolver problemas en presencia de vaguedad o incertidumbre y esta característica puede ser empleada para resolver problemas de localización ya que la posición de un objetivo está frecuentemente determinada por un conjunto de medidas o datos estadísticos que están sujetos a errores e imprecisiones.

Astrain (Astrain et al., 2005) describe un algoritmo que emplea las potencialidades de los conjuntos borrosos, para la localización; este método emplea un conjunto de reglas IF-THEN-ELSE para definir la posición del objetivo.

Las reglas son definidas teniendo en cuenta la potencia de señal recibida por los puntos de acceso en una red Wi-Fi y las zonas de localización se ubican según la distribución de los mismos.

Para la creación de las reglas se forman conjuntos que definen la señal según un determinado grado de pertenencia, de esta manera se pueden crear, por ejemplo, los conjuntos: baja potencia, muy alta potencia, o no detectado; y el tamaño de cada uno de estos conjuntos es regulado en una fase de entrenamiento.

El conjunto de reglas constituye el algoritmo y las entradas del sistema son los distintos niveles de señal recibida para los puntos de acceso y la salida es la zona de ubicación del objetivo.

Para el funcionamiento de este algoritmo es necesaria la ubicación correcta de los puntos de acceso en el escenario, para evitar situaciones redundantes o zonas donde la información recogida por los sensores no sea útil para determinar la posición con fiabilidad y precisión. Este algoritmo es netamente dependiente del escenario de aplicación y si se produce algún cambio en el mismo es necesario cambiar los conjuntos que clasifican la señal recibida, sin embargo su empleo resuelve los problemas de ambigüedad en las mediciones y permite adaptarse mejor a las condiciones arquitectónicas del escenario.

2.2.4 Algoritmos comparativos.

Además de los ya mencionados existen otros algoritmos que también dan solución al problema de la localización pero que por su naturaleza no pueden ser recogidos en las clasificaciones antes mencionadas.

Un ejemplo de ello es el Scan Matching; este algoritmo realiza la estimación de la posición a partir de la comparación de un mapa global del entorno con las lecturas de los sensores, para ello el algoritmo superpone el mapa global y la información de los sensores con el objetivo de determinar, según la lectura, la posición más probable del objetivo.

Después de la superposición del mapa con la lectura de los sensores, se realiza un análisis de las posibles posiciones obtenidas por los sensores y se desechan aquellas que al ser comparadas con el mapa son posiciones imposibles o muy poco probables.

Este algoritmo brinda resultados satisfactorios y su implementación no es muy compleja aunque en determinado momento puede necesitar el empleo de técnicas inteligentes para tomar las decisiones de cuales posiciones desechar.

2.3 Conclusiones parciales del capítulo.

Existe gran diversidad de algoritmos de localización y cada uno de ellos es capaz de solucionar el problema planteado en un entorno específico. Los algoritmos matemáticos realizan la estimación de la posición a partir del cálculo de distancias y sus resultados son independientes del objetivo a ubicar; los probabilísticos y los inteligentes pueden analizar además, el comportamiento y la secuencia de movimiento de los objetivos a ubicar y manejan, de manera eficiente, la incertidumbre en la información de la ubicación.

CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL ALGORITMO.

No es posible el diseño de un sistema de localización sin determinar previamente sus requerimientos y necesidades, la clasificación y caracterización del mismo son los primeros pasos a seguir, otorgándole al diseñador una visión general del fenómeno, que le permitirá evaluar las distintas variantes a emplear como solución.

3.1 Características y clasificación del algoritmo a diseñar.

El sistema de localización será diseñado para ubicar personas, que serán ubicadas por celdas donde cada celda se corresponda geográficamente con una oficina o salón de trabajo donde pueda estar ubicado el objetivo.

A pesar de que el procesamiento puede ser centralizado o distribuido, pues en ambos casos se puede ubicar al objetivo sin dificultad, es importante tener en cuenta que, como se trata de personas, un procesamiento distribuido implicaría que los dispositivos portátiles tuvieran una mayor capacidad de procesamiento que si se tratara de un sistema centralizado por lo que éste último es el que será empleado.

Como se trata de identificación por celda la tecnología a emplear debe ser capaz de determinar la celda o celdas en las que se encuentra el objetivo y para ello es importante tener en cuenta el radio de cobertura de los sensores a emplear y no será necesaria la estimación de distancias entre el sensor y el dispositivo a ubicar.

Como el área de cobertura de los sensores son circunferencias que pueden ser irregulares debido a factores geográficos (tecnología de radiofrecuencia) es imposible que los mismos sean distribuidos sin que existan zonas comunes para más de un sensor o zonas de silencio en las que el objetivo no será detectado, es por ello que el algoritmo empleado debe ser capaz de solucionar estas situaciones, orientando los esfuerzos de este trabajo al diseño de un algoritmo robusto que brinde una información de ubicación confiable y precisa.

3.2 Algoritmo empleado.

En el capítulo anterior fueron descritos algunos algoritmos para la localización y de manera general se clasificaron en matemáticos, probabilísticos e inteligentes cada uno de ellos con sus ventajas y limitaciones.

Para decidir el algoritmo a utilizar es importante tener en cuenta las situaciones que pueden poner en peligro la correcta ubicación del objetivo; ellas son:

- Presencia de zonas de silencio.
- Existencia de zonas pertenecientes a más de una celda.

El algoritmo debe ser flexible para poder solucionar estas situaciones y ser capaz de hacerlo de la manera más exacta posible por lo que pueden ser aprovechadas las ventajas de los algoritmos probabilísticos en cuanto al manejo de incertidumbre y el cálculo de probabilidades para determinar la posición del objetivo; sin embargo como se trata de ubicación de personas existen además otras consideraciones que pueden ser tomadas en cuenta para mejorar el desempeño y fiabilidad del algoritmo como por ejemplo:

- El movimiento de una persona sigue una secuencia determinada en función del individuo, el día, la hora y esta secuencia puede ser analizada para determinar la posición del objetivo, por ejemplo: *si Juan después de entrar a la edificación inmediatamente se dirige a su oficina, es muy probable que si acaba de comenzar la jornada laboral entonces Juan esté en su local de trabajo.*
- Existen posiciones o celdas en las que nunca, o casi nunca, estarán ubicadas determinadas personas, por ejemplo: *en una instalación hospitalaria es muy poco probable que un ginecólogo se encuentre en el área de cardiología.*

Las consideraciones anteriores, sin embargo, no pueden ser tomadas como reglas y en casos donde existan dudas en la ubicación del objetivo ellas pueden ser determinantes pero por sí solas no son capaces de ubicar a la persona de manera fiable. Para tener en cuenta estos comportamientos un algoritmo inteligente sería la mejor solución.

Será diseñado entonces un algoritmo inteligente, que de manera conjunta tome en cuenta los cálculos probabilísticos con las diferentes situaciones que se pueden presentar en la localización de personas en entornos cerrados.

3.3 Técnica inteligente utilizada.

Para la creación del algoritmo de localización se emplearon las ventajas de los sistemas expertos pues estos se destacan dentro de las áreas de la inteligencia artificial por los éxitos

alcanzados ya que son programas que resuelven problemas de un dominio de aplicación concreto de manera similar a como lo haría un experto humano en la materia (ver anexo 1).

3.4 Variables que debe tener en cuenta el sistema experto.

A pesar de las consideraciones ya mencionadas, el algoritmo debe considerar la mayor cantidad de situaciones posibles ya que, aunque el movimiento de una persona en algunos casos sigue una determinada secuencia, este movimiento también puede ser cuasi-caótico y por tanto el algoritmo no puede hacer suposiciones o restricciones que limiten los posibles recorridos o localizaciones de los objetivos a ubicar.

Por otra parte el algoritmo debe tener en cuenta los datos históricos de cada usuario y además definir la importancia de los mismos en cada momento, de igual manera debe tener en cuenta la distribución de los locales (factor geográfico) para determinar secuencias de movimientos imposibles que puedan traer errores en la estimación de la posición de la persona.

Además se debe tener en cuenta el factor tiempo pues éste, según sea el caso, puede contribuir a la correcta ubicación del objetivo.

El algoritmo debe ser lo más independiente posible del entorno de aplicación con el objetivo de que pueda ser empleado en cualquier edificación y es importante tener en cuenta que la localización con este algoritmo es por celda y en dos dimensiones de manera que, en un edificio el objetivo puede ser ubicado en la celda #20 del tercer piso, este aspecto es muy importante en el momento de elegir la tecnología a emplear.

Con el objetivo de cumplir todos los requisitos antes expuestos las variables que toma en cuenta el sistema experto son:

- Probabilidad: Este valor recoge la probabilidad del objetivo de encontrarse en una determinada celda.
- Posición detectada: Esta variable reúne las celdas donde los sensores detectan a la persona, sus valores pueden ser; ninguno, cuando la persona se encuentra en una zona de silencio; uno, cuando es captada por un solo sensor y más de uno, cuando se encuentra en la zona común entre dos a más celdas.
- Posición anterior: En esta variable contiene la posición donde el algoritmo estimó a la persona en la ejecución anterior.

- Intervalo: Toma en consideración el tiempo y su valor recoge cuantas veces se ha ejecutado el algoritmo de localización desde que la persona fue ubicada en la posición anterior, en otras palabras es el tiempo que lleva la persona en la posición anterior.
- Probabilidad de ambivalencia: Variable que toma en consideración el factor geográfico y su valor refleja la probabilidad de que estando la persona en una celda determinada, sea detectada por la celda contigua. Cada celda tiene entonces una probabilidad de ambivalencia respecto a su celda contigua.
- Posición actual: Es la variable de salida del algoritmo, constituye la celda donde está ubicada la persona en el instante actual y será la posición anterior cuando el algoritmo vuelva a ejecutarse.

Estas variables deben ser tomadas en cuenta cada una en función de la situación que se presente y en determinados momentos puede ocurrir que alguna de las variables no intervenga en el proceso de estimación de la posición del objetivo.

Los valores de la probabilidad de ambivalencia, que están relacionados con el entorno geográfico de aplicación y tienen que estar disponibles antes de que comience a ejecutarse el algoritmo por lo que estos valores deben ser recogidos en una fase inicial.

3.5 Aspectos a tener en cuenta para el diseño del algoritmo.

El movimiento de una persona en entornos interiores puede resumirse en un grupo de situaciones que pueden presentarse y que el sistema de localización tiene que ser capaz de resolver.

Para el análisis de estas situaciones y sus soluciones es importante definir la nomenclatura a emplear. En una edificación o en un entorno de trabajo de cualquier tipo, las celdas de identificación pueden ser clasificadas de dos maneras posibles: locales o pasillos.

Los locales son las celdas correspondientes a oficinas, salones de trabajo, aulas o lugares donde pueden ser encontradas las personas realizando su actividad, mientras que los pasillos son celdas de tránsito donde las personas pueden ser ubicadas mientras se trasladan de un local a otro.

Empleando esta nomenclatura el movimiento de un objetivo puede resumirse desde el punto de vista de la posición detectada en las siguientes situaciones:

- El objetivo no es detectado.

- El objetivo es detectado en una celda.
- El objetivo es detectado en dos celdas a la vez.
- El objetivo es detectado en más de dos celdas.

Estas situaciones se pueden presentar debido a las causas siguientes:

- Al área de cobertura de los sensores son circunferencias y por tanto entre una de estas áreas y otra pueden presentarse, inevitablemente, zonas de silencio o zonas comunes.
- Para la identificación de los objetivos es necesario que los sensores y los dispositivos móviles se comuniquen y se pueden presentar cambios en las condiciones de propagación de la señal debido a la presencia o eliminación de obstáculos, por ejemplo cuando la puerta de un local se abra.

En función de la situación que se presente, las decisiones a tomar varían y con ellas los pasos a seguir. Es por esto que el algoritmo debe, en cada momento, analizar las variables que realmente pueden brindar información sobre la ubicación de la persona e incluso el orden de analizarlas varía de una situación a otra.

Además es necesario tener en cuenta, para el caso de que el objetivo sea detectado en dos celdas, cuales son las posibles combinaciones que se pueden presentar; de esta manera es importante conocer, antes de tomar cualquier decisión; si es detectado en dos locales diferentes, en un pasillo y un local o en dos celdas de pasillo.

3.6 Algoritmo diseñado.

Para el análisis de las variables que el algoritmo tiene en cuenta, durante el proceso de ejecución deben ser identificadas las situaciones descritas en el epígrafe anterior y para ello existen puntos donde se toman decisiones que determinan el camino a seguir; para el correcto y claro análisis del algoritmo diseñado es necesario emplear una descripción que nos permita de manera sencilla, la correcta identificación del camino a tomar; para ello cada punto de decisión del algoritmo será identificado con una letra y el camino a seguir con los números uno o dos, tomando como convenio que los caminos a la izquierda del punto de decisión se identifican como uno y a la derecha como dos.

Entonces la secuencia A1B puede ser interpretada como el recorrido desde el punto de decisión A hasta el punto de decisión B tomando el camino a la izquierda del punto A y la secuencia N2 es el recorrido desde el punto N por el camino de la derecha que conduce a una decisión.

Para comprender el algoritmo debemos analizar todas las maneras posibles que puede ser recorrido, ver figura 2.1 a) b) c):

El primer punto de decisión es el encargado de definir si la persona es o no detectada, si no es detectado (camino A2) entonces el objetivo se encuentra en una zona de silencio y una estimación acertada de su ubicación tomaría en cuenta la posición anterior del objetivo para afirmar que el mismo se encuentra en la zona de silencio más cercana a la celda donde fue ubicado el objetivo la última vez.

El camino A1B define entonces si la persona es captada por un sensor ya que en ese caso (camino A1B1) la posición actual sería la celda donde fue detectada (posición actual = posición detectada).

Si el objetivo es captado por más de un sensor entonces en el punto C se determina si es detectado en dos o más celdas y si es ubicado en más de dos (camino C1) entonces la posición puede ser determinada por un proceso de triangulación entre las celdas involucradas, este proceso debe haberse realizado previamente en la fase inicial.

Cuando el objetivo es captado por sólo dos sensores (C2D) es necesario clasificar cual de las posibles combinaciones están presentes y el punto D del algoritmo es el encargado de determinar el camino a seguir.

Si el objetivo es detectado en dos locales (D1E) el primer criterio a evaluar es la probabilidad de la persona de encontrarse en cada uno de los locales involucrados y la ubicación del objetivo será el local que tenga la mayor probabilidad (E1), para esta comparación se emplea el criterio “mucho mayor” el cual será explicado en la sección siguiente, por otra parte si las probabilidades son comparables (E2F) entonces se toma en cuenta la posición anterior del objetivo; si fue pasillo (F1) entonces si pensamos en la secuencia de movimiento, la persona caminaba por el pasillo y entró a un local que el sistema no es capaz de determinar con precisión y la ubica en dos celdas correspondientes a dos locales diferentes, en este caso el algoritmo resuelve la dificultad ubicando a la persona en la celda donde la probabilidad de ambivalencia es mayor.

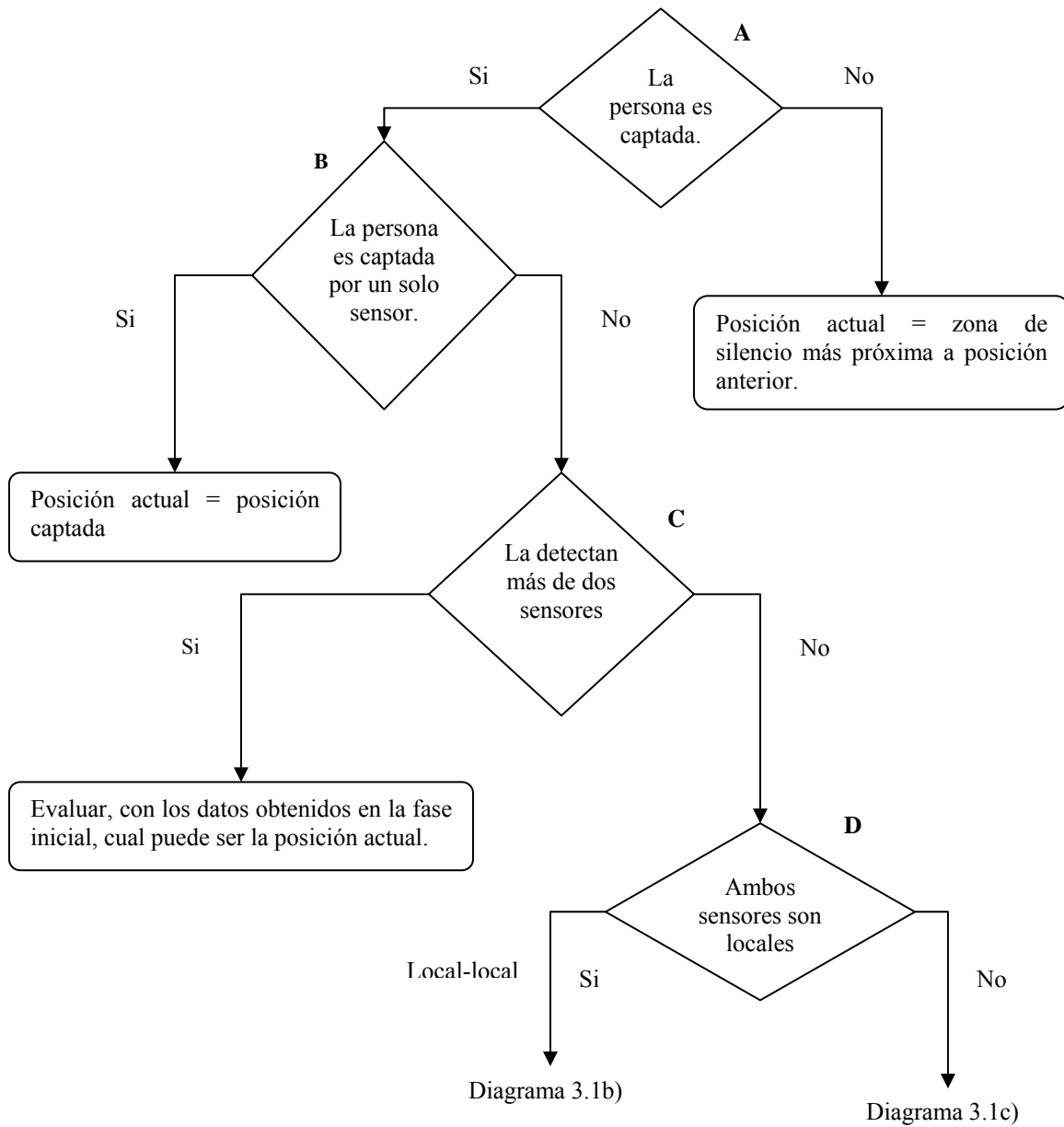


Figura 3.1 a) Diagrama de flujo del algoritmo diseñado.

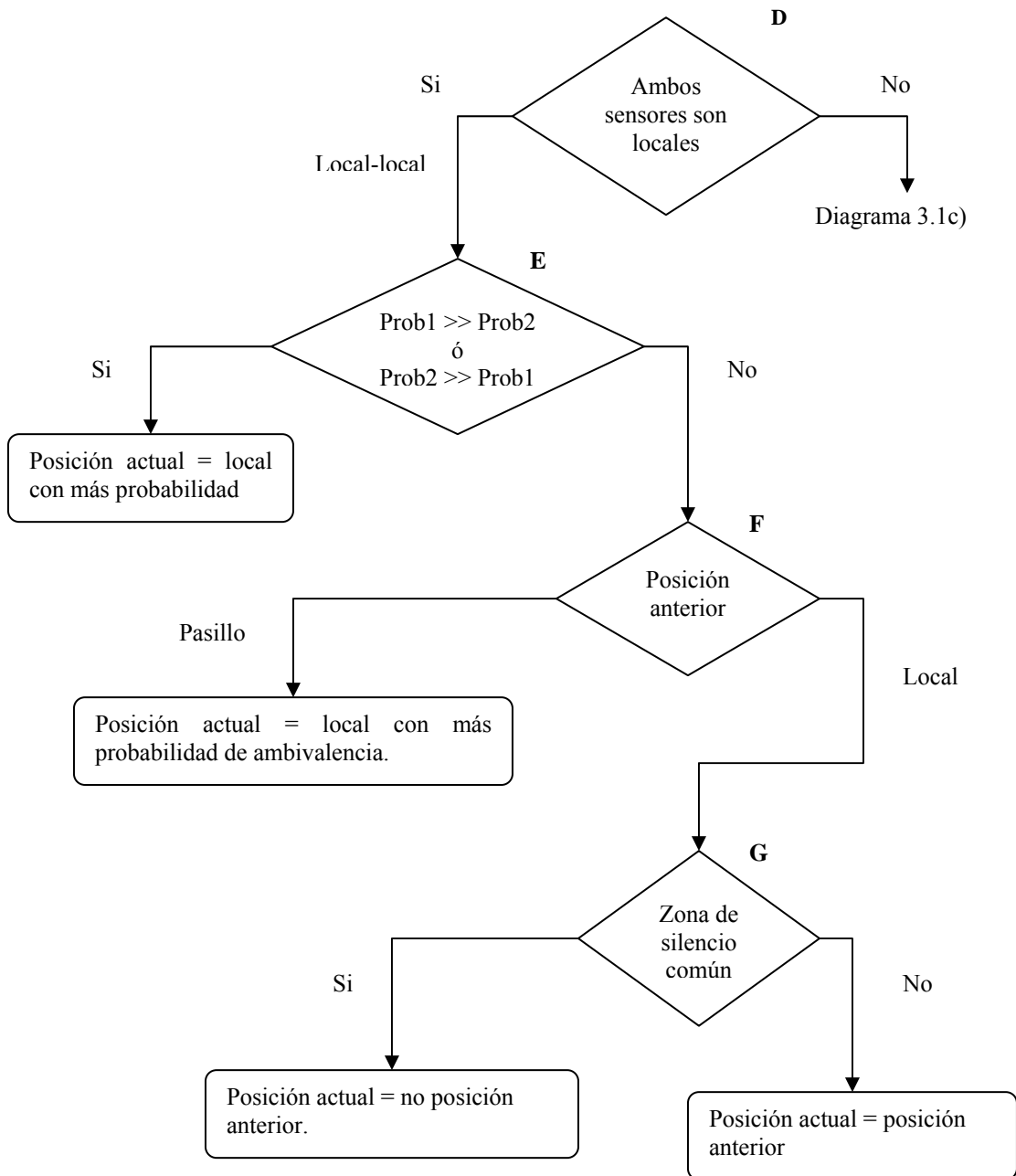


Figura 3.1b) Diagrama de flujo del algoritmo diseñado.

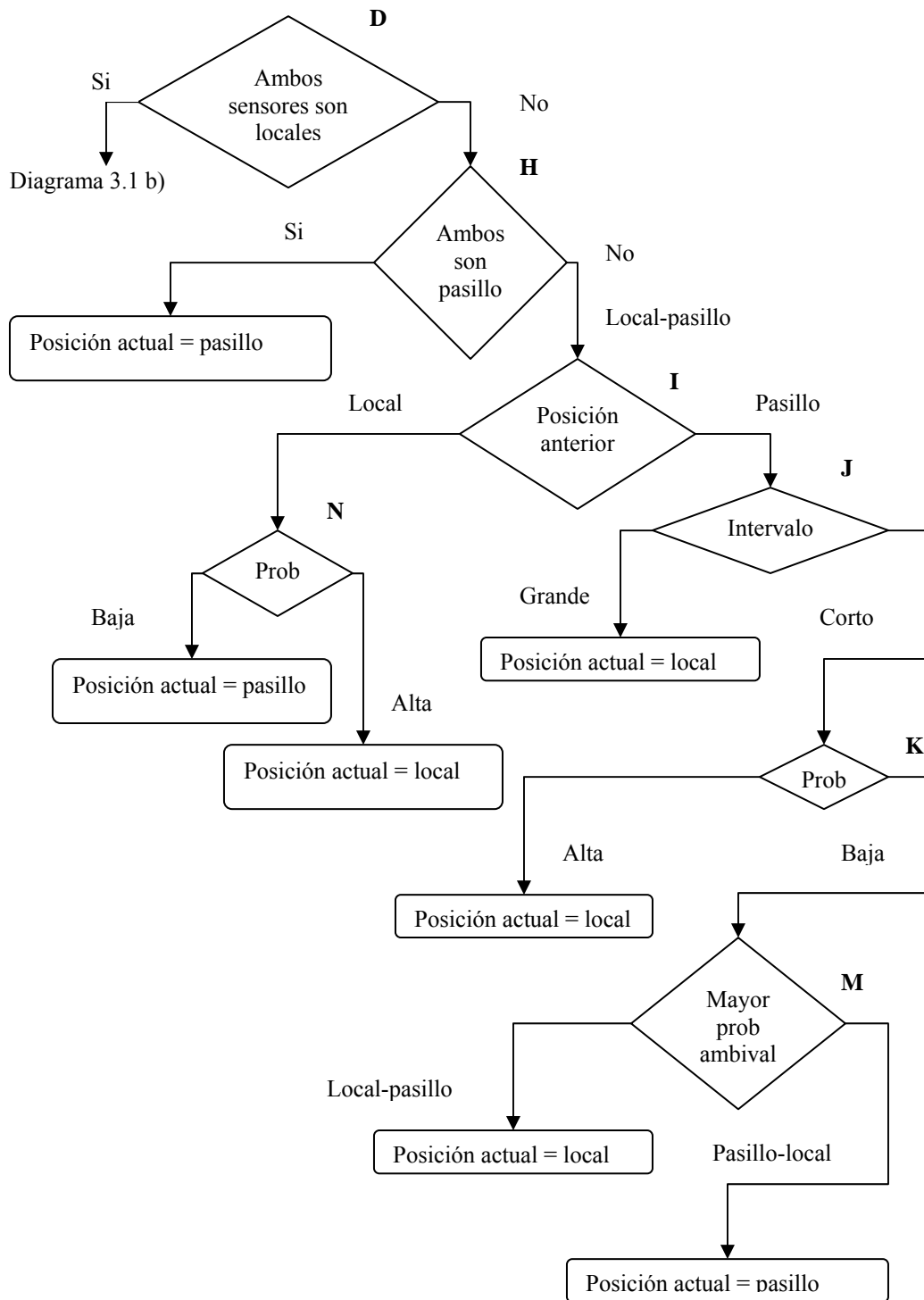


Figura 3.1 c) Diagrama de flujo del algoritmo diseñado.

Si la posición anterior fue una de las celdas donde es detectado (D1E2F2G), el criterio empleado por el algoritmo es la presencia de una zona de silencio común a ambas celdas, de ser así, es muy probable que la persona haya transitado de un local a otro sin que el sistema lo haya detectado y el algoritmo lo ubica entonces en la celda donde no fue detectado anteriormente (G1); si no existe la zona de silencio entonces es imposible que el objetivo haya cambiado de celda pues no fue detectado en un pasillo con anterioridad (G2). Hasta este momento hemos analizado el camino D1 que se recorre cuando la persona es detectada en dos locales. Si el objetivo es ubicado en dos celdas correspondientes a pasillos (D2H1) entonces la posición exacta de la celda en que se encuentra no tiene la misma importancia que el resto de los casos ya que es muy probable que el objetivo esté en movimiento y por tanto una buena decisión a tomar puede ser esperar un determinado número de intervalos para verificar si el objetivo ya puede ser ubicado en un local.

El camino H2 I se encarga de determinar la posición cuando el objetivo es detectado en dos celdas correspondientes a un local y un pasillo, para ello es necesario determinar cual fue la posición anterior (I), si la posición anterior fue el local (I2N) entonces la probabilidad es la encargada de definir la ubicación final, si su valor es “pequeño” (N1) entonces la persona puede haber entrado al local pero es muy probable que salga inmediatamente (por eso es que su probabilidad es baja) y por tanto el algoritmo define la posición actual como la celda correspondiente al pasillo; mientras que, si la probabilidad es “alta”, la posición actual es la celda correspondiente al local y por tanto el sistema puede haber detectado en dos celdas al objetivo por razones inherentes a la propagación de la señal (por ejemplo una puerta fue abierta o se eliminó un obstáculo). Los conceptos de probabilidades “alta” y “baja” serán discutidos en la sección siguiente.

En el punto J se tiene en cuenta la variable intervalo ya que si la persona es detectada en un local y en un pasillo, la posición anterior fue pasillo y lleva mucho tiempo en esta ubicación entonces es razonable pensar que el objetivo entró al local (H2I1J1). Por otra parte si lleva poco tiempo en la posición anterior entonces se toma en consideración la variable probabilidad (I1J2K).

Si el valor de la probabilidad (K) es “alta”, entonces el algoritmo ubica al objetivo en la celda correspondiente al local (K1), si su valor es “bajo” entonces el algoritmo define como

posición actual del objetivo la celda con mayor probabilidad de ambivalencia (K2M1 ó K2M2).

3.7 Criterios empleados en las comparaciones.

Para la correcta comparación entre los valores de probabilidad es necesario tener en cuenta la representatividad que cada valor tiene. Durante la realización de un experimento mientras mayor sea el número de realizaciones, más acertado será el valor de la probabilidad por lo que, en la medida que el algoritmo de localización se ejecute los valores de las probabilidades se acercarán cada vez más al comportamiento real de la persona.

El algoritmo diseñado emplea el criterio de “mucho mayor” para definir, en el punto de decisión E, si el objetivo se encuentra en uno u otro local; para ello en esta comparación puede emplearse la fórmula: $P_1 * \% + P_1 < P_2$ donde los términos P_1 y P_2 son las probabilidades a comparar, el término % es el criterio empleado en la comparación y su valor puede ser ajustado en la fase inicial.

De igual manera los criterios de “bajo” y “alto” empleados en los puntos de decisión N y K; “grande” y “corto” empleados en J, deben ser elegidos cuidadosamente y no tienen por qué ser iguales en todos los puntos, la única condición que deben cumplir es que sean excluyentes, para evitar ambigüedades durante el proceso de ejecución del algoritmo.

3.8 Fase inicial.

Antes de la puesta en marcha del algoritmo de localización es necesaria la realización de una fase destinada, fundamentalmente, a determinar la influencia del factor geográfico en la estimación de la posición actual de la persona.

La correcta ubicación de los sensores a emplear constituye la clave para el buen funcionamiento del algoritmo diseñado, esta ubicación debe realizarse de manera que la presencia de zonas de silencio o zonas comunes sean las menores posibles y además cada sensor debe ser caracterizado en local o pasillo según sea el caso.

La realización de esta fase inicial tiene cuatro objetivos fundamentales:

- Distribuir y caracterizar correctamente cada uno de los sensores.
- Identificar las zonas de silencio y definir si son comunes para algunas de las celdas.
- Identificar las celdas en las cuales el objetivo puede ser detectado por más de dos sensores.

- Identificar las celdas donde el objetivo puede ser detectado por dos sensores y definir para cada celda involucrada su probabilidad de ambivalencia respecto a la otra.

Como resultado de la realización de esta fase deben quedar recogidos los valores de la probabilidad de ambivalencia, así como las celdas en las cuales el objetivo es detectado por más de dos sensores quedando claro cuales son los sensores que lo detectan. Estos datos nunca sufrirán cambios durante la ejecución del algoritmo.

3.9 Actualización de los valores de probabilidad.

Para que el algoritmo sea capaz de adaptarse a las nuevas condiciones o situaciones que se pueden presentar es necesaria la correcta actualización del valor de probabilidad y para ello es importante considerar que: cada vez que el algoritmo finalice su ejecución dará como resultado una estimación de la posición del objetivo.

Una primera aproximación al problema de la actualización de la probabilidad, conduce a pensar que siempre que el algoritmo se ejecute la probabilidad puede ser actualizada utilizando el cálculo convencional de probabilidad (cantidad de veces que el objetivo es detectado en esa posición dividido entre el número total de ejecuciones del algoritmo); sin embargo, debido a que en el proceso de estimación existe incertidumbre, pueden ocurrir errores en la posición estimada por el algoritmo y estos errores pueden propagarse en caso de que la probabilidad sea actualizada de esa manera.

Para evitar situaciones como la anteriormente expuesta la probabilidad puede ser actualizada en los puntos del algoritmo donde no exista incertidumbre (caminos A2, A1B1 y A1B2C1) pero dado que el algoritmo puede ser recorrido por 13 caminos distintos su capacidad de adaptarse se verá seriamente afectada.

Una solución viable a este problema puede ser actualizar la probabilidad siempre que el algoritmo se ejecute por un camino donde no exista incertidumbre y para el resto de los casos el valor de la probabilidad puede actualizarse ponderando su valor en mayor o menor medida en función de la incertidumbre del camino seguido.

3.10 Software para la implementación.

Para verificar su funcionamiento, el algoritmo fue programado empleando la máquina de inferencia WUCShell en su versión 1.0 que permite el diseño de sistemas expertos y para

ello emplea una interacción con el usuario utilizando un sistema de preguntas y respuestas que permite la entrada/salida de datos (ver anexo 2).

El algoritmo fue programado a partir del punto de decisión D debido a que a partir de este punto es donde toma mayor complejidad y representatividad su funcionamiento.

3.11 Resultados de las pruebas realizadas.

El programa implementado (ver anexo 3) fue sometido a pruebas para comprobar si todos los casos y situaciones eran solucionados y detectar la existencia de reglas contradictorias que pongan en peligro su correcto funcionamiento.

Las variables que el programa debe analizar en cada situación fueron introducidas a través del mecanismo de preguntas del software y los datos fueron recogidos en la tabla 3.1.

Para el análisis de los datos de la posición detectada se decidió enumerar los sensores y se tomó como convenio que los sensores cuyo número identificativo es menor que 100 corresponden a sensores de locales y el resto a sensores de pasillos.

Tabla 3.1

Posición detectada		Posición anterior	Probabilidad		Probabilidad Ambivalencia		Zona común	Intervalo	Camino	Posición actual
1	2		1	2	1-2	2-1				
20	55	--	0.2	0.6	--	--	--	--	D1E1	55
30	31	130	0.5	0.6	0.5	0.2	--	--	D1E2F1	30
30	31	30	0.8	0.7	--	--	si	--	D1E2F2G1	31
30	31	31	0.2	0.3	--	--	no	--	D1E2F2G2	31
130	200	--	--	--	--	--	--	--	D2H1	130 200
5	220	5	0.4	--	--	--	--	--	D2H2I1N1	220
300	15	15	--	0.6	--	--	--	--	D2H2I1N2	15
25	105	105	--	--	--	--	--	3	D2H2I2J1	25
135	17	135	--	0.7	--	--	--	1	D2H2I2J2K1	17
90	255	255	0.2	--	0.5	0.2	--	0	D2H2I2J2K2M1	90
301	38	301	--	0.3	0.5	0.2	--	0	D2H2I2J2K2M2	301

Los criterios empleados en las comparaciones fueron ajustados de la siguiente manera:

- En la comparación “mucho mayor”, el valor de % fue ubicado en 0.5 lo que representa que la comparación se realiza teniendo en cuenta que el valor de una probabilidad sea un 50% mayor que la otra.
- Para los criterios “grande” y “corto” el valor elegido fue dos con lo que, si el algoritmo se ejecuta más de dos veces y el objetivo permanece en la posición anterior entonces la variable intervalo es considerada como grande.
- En el caso de “alta” y “baja” el valor con el cual comparar fue 0.5.

3.12 Conclusiones parciales del capítulo.

El algoritmo fue diseñado teniendo en cuenta las secuencias lógicas de movimiento de personas en entornos cerrados y combina técnicas inteligentes y probabilísticas dando como resultado un sistema híbrido que toma en consideración el comportamiento del individuo para determinar su posición.

Las pruebas realizadas reflejaron que el algoritmo se ejecuta correctamente, todos los caminos son recorridos sin dificultad y no existen contradicciones en las reglas planteadas. Además durante la ejecución del algoritmo no todas las variables son analizadas lo que permite optimizar el proceso de localización y solamente analizar los datos representativos en función de la situación presentada.

CONCLUSIONES.

La terminación del presente trabajo de diploma conduce a las siguientes conclusiones:

1. Se cuenta con un material que de manera organizada, clasifica y caracteriza los sistemas de localización en interiores.
2. Son descritos y clasificados los algoritmos empleados en la localización de personas en entornos interiores.
3. Son discutidas las características típicas y situaciones lógicas que describen el movimiento de personas en entornos interiores.
4. Fue diseñado un algoritmo para la localización de personas en entornos interiores que toma en cuenta, para ubicar a la persona, el comportamiento de la misma.
5. El algoritmo diseñado analiza los datos en función de la situación que se presente, optimizando así el tiempo de ejecución.
6. La combinación de técnicas inteligentes y probabilísticas hacen que el algoritmo tenga mayor capacidad de resolución del problema planteado.

RECOMENDACIONES.

Debido a la complejidad y extensión del tema se considera importante continuar el estudio de estos sistemas y para ello es oportuno:

- Profundizar en el estudio de los algoritmos probabilísticos e inteligentes que son empleados para la localización en interiores.
- Estudiar el proceso de actualización de los valores de probabilidad y determinar de manera certera un mecanismo que lo permita.
- Implementar el algoritmo diseñado y validar su funcionamiento en un escenario real.
- Evaluar otras técnicas inteligentes como fuzzy, redes neuronales o machine learning para desarrollar otros algoritmos de localización y compararlos con el algoritmo diseñado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ASTRAIN, J. J., VILLADANGOS, J. & CORDOBA, A. (2005) Localización y seguimiento de terminales móviles en entornos indoor. Pamplona, Departamento de Matemática e Informática Universidad Pública de Navarra.
- AUGUST, N. (2004) UWB Applications and Technologies. Virginia, Virginia Tech VLSI for Telecommunications Group.
- BAHL, P. & PADMANABHAN, V. N. (2000) Radar: An in-building user location and tracking system. *Infocom*. IEEE.
- BARBOLLA, A. M. B., PORTAS, J. A. B. & CORREDERA, J. R. C. (2005) Tecnologías de localización: Fundamentos y Aplicaciones IN CORREDERA, J. R. C. (Ed.). Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.
- CARCADILLA, A. (2006) Sistemas de posicionamiento basados en WiFi. Universidad Politécnica de Cataluña.
- CHEUNG, K. W. & SO, H. C. (2005) A Multidimensional Scaling Framework for Mobile Location Using Time-of-Arrival Measurements. *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*.
- COHEN, D., COHEN, L., FAILLACE, G., GIANATELLI, M., SHAALO, V. H., MACHIAVELLO, D., NAVARRO, S. & GROSSO, L. D. O. (2005) La Localización utilizando wi-fi (802.11b-g), diferentes algoritmos. Buenos Aires, Universidad de Palermo.
- CORTÁZAR, I. & SANZ, P. (2005) Localización en entornos WiFi. *Telefónica investigación y desarrollo*. Madrid.
- CRESPO, M. A. (2003) Localización probabilística en un robot con visión local. *Departamento de Sistemas Inteligentes Aplicados*. Universidad Politécnica de Madrid.
- ERGEN, S. C. (2004) ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary.
- FOX, D., HIGHTOWER, J., KAUZ, H., LIAO, L. & PATTERSON, D. J. (2003) Bayesian Techniques for Location Estimation. *Location-aware computing, UBIComp 2003*.

- GALLARDO, D. (1999) Aplicación del muestreo bayesiano en robots móviles: estrategias para la localización y estimación de mapas del entorno. *Departamento de Tecnología Informática y Computación*. Universidad de Alicante.
- GARCÍA, E. M., BERMÚDEZ, A., CASADO, R. & QUILES, F. J. (2007) Localización para redes inalámbricas de sensores mediante intersección hexagonal Albacete, Departamento de Sistemas Informáticos, Universidad de Castilla–La Mancha.
- GÓMEZ, I. J. B. (2005) Estudi i implementació d'una aplicació de localització en xarxes de sensors. Universidad politécnica de Cataluña.
- GUERRERO, P. & RUIZ, J. (2005) Auto-localización de un robot móvil AIBO mediante el método de Monte Carlo. Dept. Ing. Eléctrica, Universidad de Chile.
- GWON, Y., JAIN, R. & KAWAHARA, T. (2004) Robust Indoor Location Estimation of Stationary and Mobile Users. DoCoMo Communications Laboratories.
- JIMÉNEZ, A. R., SECO, F., PRIETO, C. & ROA, J. (2005) Tecnologías sensoriales de localización para entornos inteligentes. *I Congreso Español de Informática. Simposium UCAM 05 Computación Ubicua e Inteligencia Ambiental*". Granada.
- MANDKE, K., NAM, H., YERRAMNENI, L. & ZUNIGA, C. (2003) The Evolution of UWB and IEEE 802.15.3a for Very High Data Rate WPAN. UWB Group, University of Texas.
- MAO, G., FIDAN, B. & ANDERSON, B. D. O. (2006) Wireless Sensor Network Localization Techniques.
- PRIYANTHA, N. B. (2005) The Cricket Indoor Location System. *Department of Electrical Engineering and Computer Science*. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- ROA, J. O., JIMÉNEZ, A. R., SECO, F., PRIETO, C., EALO, J. L., RAMOS, F. & GUEVARA, J. (2007) Distribución optimizada de balizas para sistemas de localización fundamentados en Trilateración Esférica e Hiperbólica. *MAEB 2007*.
- SAHINOGLU, Z. & GEZICI, S. (2006) Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard. *IEEE Wireless and Microwave Technology Conference*. Mitsubishi Electric Research Laboratories, Massachusetts.
- SÁNCHEZ, R. (2005) Sistemas de localización en interiores. *Comunicaciones*.

SAVI, T. Active and Passive RFID: Two Distinct, But Complementary, Technologies for Real-Time Supply Chain Visibility.

SHEPARD, S. (2004) RFID: The promise of a strategic technology.

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

- AOA** Ángulo de llegada (Angle of Arrival).
- BC** Base de conocimiento.
- DOA** Dirección de llegada (Direction of Arrival).
- FDM** Multiplexación por división de frecuencia (Frequency Division Multiplexing).
- FCC** Comisión federal de comunicaciones (Federal Communications Commission).
- FRC** Forma de Representación del Conocimiento.
- GPS** Sistema de posicionamiento global (Global Position System).
- IEEE** Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- ISM** Industrial, científica y médica (Industrial, Scientific and Medical).
- MCL** Localización de Monte Carlo (Monte Carlo Location).
- MI** Máquina de inferencia.
- MSP** Métodos de Solución del Problema.
- RFID** Identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency Identification).
- RSS** Intensidad de la señal recibida (Received Signal Strength).
- RSSI** Indicador de intensidad de la señal recibida (Received Signal Strength Indicator).
- SE** Sistema experto.
- SIR** Muestreo importancia remuestreo (Sampling Importance Resampling).
- SNR** Relación señal a ruido (Signal Noise Relation).
- TDOA** Diferencia de tiempo de llegada (Time Difference of Arrival).
- TOA** Tiempo de llegada (Time of Arrival).
- UWB** Señales de banda ultra ancha (Ultra Wideband).
- WLAN** Redes inalámbricas de área local (Wireless Local Area Network).
- WPAN** Redes personales inalámbricas (Wireless Personal Area Network).

ANEXO 1: SISTEMAS EXPERTOS.

Los sistemas expertos están compuestos por dos elementos básicos:

1. La Base de Conocimiento (BC), que contiene el conocimiento sobre el problema.
2. La Máquina de Inferencia (MI), que implementa los métodos para manipular dicho conocimiento.

La segunda se encarga de inferir nuevos conocimientos, a través de un determinado mecanismo y utiliza con ese fin el contenido de la primera que expresa, en un formalismo dado, el conocimiento acerca de un dominio específico.

Podemos ver entonces al Sistema Experto como un modelo:

$$SE = BC + MI$$

La BC almacena el conocimiento en una determinada notación, conocida como Forma de Representación del Conocimiento (FRC) que constituye el formalismo de este modelo.

La MI, por su parte, implementa los Métodos de Solución del Problema (MSP). Desde este punto de vista un SE es entonces:

$$SE = FRC + MSP$$

Formas de representación del conocimiento.

Se denomina Forma de Representación del Conocimiento (FRC) a la notación usada para representar el conocimiento, es decir a la manera en que éste se describe y se almacena.

No existe actualmente una FRC general que permita usarse en todo tipo de aplicación y ante un problema de un dominio específico es necesario realizar la selección de la FRC más adecuada para dicho problema. Entre las FRC más conocidas pueden ser mencionadas: strips, redes semánticas, scripts, frames y reglas de producción; estas últimas son la FRC empleada por el software utilizado para la implementación del algoritmo.

Reglas de producción.

Las reglas de producción son la FRC más popular, y para la cual se han desarrollado más herramientas comerciales.

En su forma más sencilla, una regla de producción no es más que un par (A,B) que puede representarse en el cálculo proposicional como $A \rightarrow B$. Para manipular la información contenida en ellas se utiliza la regla del modus ponens: del hecho A y $A \rightarrow B$ se infiere B.

Las reglas expresan siempre una condicional, con un antecedente y un consecuente. La interpretación de una regla es que si el antecedente se puede satisfacer entonces se obtiene el consecuente. La regla de producción representa una unidad relativamente independiente de conocimiento la cual puede describir relaciones como las siguientes:

Si precondición P entonces conclusión C

Si situación S entonces acción A

Si condición C1 entonces no condición C2

ANEXO 2: SOFTWARE WUCSHELL.

WUCShell es una máquina de inferencia que forma parte de un paquete denominado SESE formado además por la máquina de inferencia TeachShell, el compilador de línea RulesCompiler y el módulo Expert que contiene el mecanismo de inferencia de WUCShell con el objetivo de incorporarlo a otras aplicaciones.

Para el desarrollo de Sistemas Expertos WUCShell es un ambiente integrado que no necesita de ningún otro componente del sistema aunque, puede interpretar las bases de conocimiento compiladas por el módulo RulesCompiler.

Los objetos que manipula esta máquina de inferencia de SESE se denominan atributos, y pueden ser de tres tipos:

1. Hechos: cuando tienen un valor asociado.
2. Deducibles: cuando forman parte de la conclusión de una regla.
3. Preguntables: cuando tienen una pregunta asociada.

Ambiente de trabajo de WUCShell.

Esta máquina de inferencia está compuesta por tres bloques fundamentales como se muestra en la figura A2.1 que conforman el cuerpo del programa.

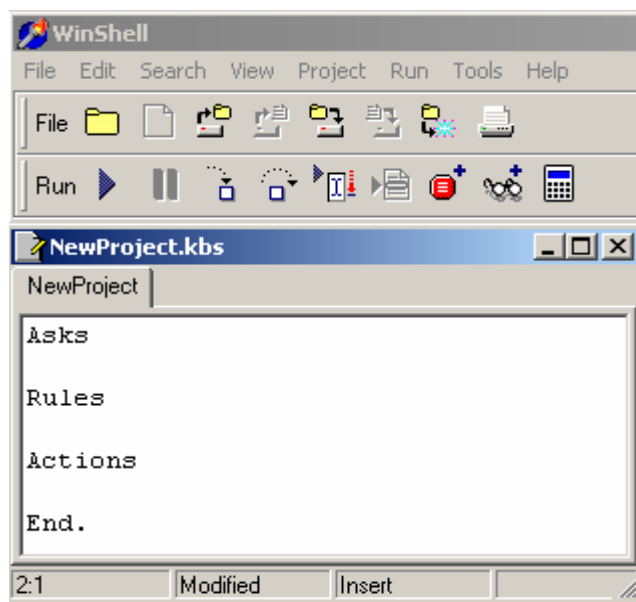


Figura A2.1 Ambiente de trabajo de WUCShell

En el bloque de preguntas (Asks) se definen los atributos preguntables y esta definición puede traer asociada el dominio de la respuesta o las opciones que el usuario puede elegir. Las reglas son definidas en el siguiente bloque (rules) y los atributos asociados a los antecedentes de estas reglas pueden ser atributos preguntables o hechos, mientras los consecuentes son los atributos que serán inferidos durante el proceso de ejecución. En el bloque de acciones (Actions) se definen los atributos que el programa debe inferir así como la presentación de los datos.

Adicionalmente puede existir otro bloque (External) que especifica una lista de atributos que se usan en una base de conocimiento dada y no están declarados en ella. Esta facilidad permite enlazar hechos entre diferentes bases de conocimiento.

ANEXO 3: PROGRAMA DESARROLLADO.

Haciendo uso de las facilidades del software para enlazar distintas bases de conocimiento el programa desarrollado fue dividido en un total de nueve bases de conocimientos diferentes que describen la totalidad de los caminos definidos en el algoritmo a partir del punto de decisión D y cada una de ellas fue identificada con el punto de decisión al que corresponde.

Inicio.kbs

Asks

Ask sensor1: 'Diga cuál sensor toma al objetivo'

Ask sensor2: 'Diga el otro sensor que toma al objetivo'

Rules

Rule 1

if (sensor1 > 100) and (sensor2 > 100)

then

situación := 'PasPas'

Actions

Display 'El objetivo está en el pasillo entre las posiciones #', sensor1, 'y #',
sensor2

end;

Rule 2

if (sensor1 < 100) and (sensor2 < 100)

then

situación := 'LocLoc'

Actions

SaveFact sensor1, sensor2

Chain 'E.kbo'

end;

Rule 3

if (sensor1 < 100) and (sensor2 > 100) or (sensor1 > 100) and (sensor2 < 100)

then

situación := 'LocPas'

Actions

SaveFact sensor1, sensor2

Chain 'I.kbo'

end;

Actions

Find situación

End.

E.kbs

External

sensor1,

sensor2

Asks

Ask prob1: 'Cuál es la probabilidad del objetivo de encontrarse en la primera celda'

Ask prob2: 'Cuál es la probabilidad del objetivo de encontrarse en la segunda celda'

Rules

Rule 1

if $\text{prob1} > 0.5 * \text{prob2} + \text{prob2}$

then

pos_actual := sensor1

Actions

Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual

end;

Rule 2

if $0.5 * \text{prob1} + \text{prob1} < \text{prob2}$

then

pos_actual := sensor2

```

    Actions
        Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual
    end;
Rule 3
    if exclude pos_actual
    then
        pos_actual:= 'unknow'
        Actions
            SaveFact sensor1, sensor2
            Chain 'F.kbo'
        end;
    end;

```

```

Actions
    Find pos_actual
End.

```

F.kbs

```

External
    sensor1,
    sensor2

```

```

Asks
    Ask pos_anterior: 'Cuál era la ubicación anterior del objetivo'
    Ask prob_amb1: 'Cuál es la probabilidad de ambivalencia de la primera celda respecto a la
                    segunda'
    Ask prob_amb2: 'Cuál es la probabilidad de ambivalencia de la segunda celda respecto a la
                    primera'

```

Rules

```

Rule 1
    if (pos_anterior > 100) and (prob_amb1 > prob_amb2)

```

```
then
  pos_actual:=sensor1
  Actions
    Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual
end;
```

Rule 2

```
if (pos_anterior > 100) and (prob_amb2 > prob_amb1)
  then
    pos_actual:=sensor2
    Actions
      Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual
  end;
```

Rule 3

```
if exclude pos_actual
  then
    pos_actual:='unknow'
    Actions
      SaveFact sensor1, sensor2, pos_anterior
      Chain 'G.kbo'
  end;
```

Actions

Find pos_actual

End.

G.kbs

External

sensor1, sensor2, pos_anterior

Asks

Ask zona _ común: 'Existe un zona de silencio común en la entrada de los locales'

domain 'Si', 'No'

Rules

Rule 1

```
if (zona _ común = 'Si') and (pos_anterior = sensor1)
  then
    pos_actual := sensor2
  end;
```

Rule 2

```
if (zona _ común = 'Si') and (pos_anterior = sensor2)
  then
    pos_actual := sensor1
  end;
```

Rule 3

```
if zona _ común = 'No'
  then
    pos_actual := pos_anterior
  end;
```

Actions

Find pos_actual

Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual

End.

I.kbs

External

sensor1, sensor2

Asks

Ask pos_anterior: 'Cuál era la ubicación anterior del objetivo'

Rules

Rule 1

```
if pos_anterior > 100
  then
    pos_actual := 'unknow'
  Actions
    SaveFact sensor1, sensor2
    Chain 'J.kbo'
end;
```

Rule 2

```
if pos_anterior <= 100
  then
    pos_actual := 'unknow'
  Actions
    SaveFact sensor1, sensor2, pos_anterior
    Chain 'N.kbo'
end;
```

Actions

Find pos_actual

End.

J.kbs

External

sensor1, sensor2

Asks

Ask intervalo: 'Cuántos intervalos de tiempo han transcurrido desde la primera vez que el objetivo fue ubicado en la posición anterior'

Rules

Rule 1

```
if (intervalo > 2) and (sensor1 <= 100)
  then
    pos_actual := sensor1
  Actions
    Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual
end;
```

Rule 2

```
if (intervalo > 2) and (sensor2 <= 100)
  then
    pos_actual := sensor2
  Actions
    Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual
end;
```

Rule 3

```
if intervalo <= 2
  then
    pos_actual := 'unknow'
  Actions
    SaveFact sensor1, sensor2
    Chain 'K.kbo'
end;
```

Actions

Find pos_actual

End.

K.kbs

External

sensor1, sensor2

Asks

Ask prob: 'Cuál es la probabilidad del objetivo de encontrarse en el local en cuestión'

Rules

Rule 1

if (prob \geq 0.5) and (sensor1 \leq 100)

then

pos_actual := sensor1

Actions

Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual

end;

Rule 2

if (prob \geq 0.5) and (sensor2 \leq 100)

then

pos_actual := sensor2

Actions

Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual

end;

Rule 3

if prob $<$ 0.5

then

pos_actual := 'unknow'

Actions

SaveFact sensor1, sensor2

Chain 'M.kbo'

end;

Actions

Find pos_actual

End.

M.kbs

External

sensor1, sensor2

Asks

Ask prob_amb1: 'Cuál es la probabilidad de ambivalencia de la primera celda respecto a la segunda'

Ask prob_amb2: 'Cuál es la probabilidad de ambivalencia de la segunda celda respecto a la primera'

Rules

Rule 1

```
if prob_amb1 > prob_amb2
  then
    pos_actual := sensor1
  end;
```

Rule 2

```
if prob_amb2 > prob_amb1
  then
    pos_actual := sensor2
  end;
```

Actions

Find pos_actual

Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual

End.

N.kbs

External

sensor1, sensor2, pos_anterior

Asks

Ask prob: 'Cuál es la probabilidad del objetivo de encontrarse en el local en cuestión'

Rules

Rule 1

if (prob < 0.5) and (sensor1 > 100)

then

pos_actual := sensor1

end;

Rule 2

if (prob < 0.5) and (sensor2 >100)

then

pos_actual := sensor2

end;

Rule 3

if (prob >= 0.5) and (sensor1 <= 100)

then

pos_actual := sensor1

end;

Rule 4

if (prob >= 0.5) and (sensor2 <= 100)

then

pos_actual := sensor2

end;

Actions

Find pos_actual

Display 'El objetivo está en la celda #', pos_actual

End.