



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE RADIO  
LOCALIZACIÓN CON APLICACIONES TERRESTRES**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A:

**Constantino Carlos Reyes Aldasoro**

DIRECTOR : DR. FEDERICO KUHLMANN R.



MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 2	IMPORTANCIA DE LA RADIO LOCALIZACIÓN .....	5
CAPÍTULO 3	ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS .....	10
PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS .....		10
TECNOLOGÍAS DE RADIO LOCALIZACIÓN		
RADAR .....		17
LORAN .....		24
PROXIMITY .....		29
GPS .....		34
CAPÍTULO 4	CONSIDERACIONES PARA LA UTILIZACIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DE RADIO LOCALIZACIÓN .....	39
DESEMPEÑO .....		39
COMUNICACIONES .....		44
PROTOCOLOS .....		48
CAPÍTULO 5	DISEÑO DE SISTEMAS DE RADIO LOCALIZACIÓN ...	52
EJEMPLO 1 .....		52
EJEMPLO 2 .....		74
EJEMPLO 3 .....		86
CAPÍTULO 6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	103
REFERENCIAS .....		105
APÉNDICE	DESARROLLO DEL PROGRAMA QUE DETERMINA EL ÁREA DE COBERTURA DE UN SISTEMA LORAN DE CUATRO ANTENAS .....	108

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La radio localización está muy relacionada con la radio navegación. Los sistemas tanto de una como de otra tecnología se pueden utilizar con fines alternos. Las regulaciones para radio de la International Telecommunications Union (ITU) [1] definen a la radio navegación como una forma de radio determinación que se utiliza para fines de navegación, incluyendo los avisos de obstrucción; la radio localización incluye los casos de radio determinación que no se especifiquen como radio navegación. La radio determinación es la identificación de la posición, velocidad, o alguna otra característica de un objeto, o bien la obtención de información relacionada con estos parámetros, por medio de las propiedades de propagación de las ondas de radio. Existe también la radiogoniometría que es una técnica que permite fijar la ubicación de una radioemisora a base de triangulación, se considera como un caso de la radio localización.

El objetivo de los métodos de radio localización que serán analizados a lo largo de esta tesis es obtener la posición de un objeto móvil o fijo por medio de mediciones sobre ondas de radio que viajan entre el objeto y una o varias estaciones fijas. Por lo general se utilizan mediciones de tiempo o de fase para determinar la distancia o dirección del camino de la onda. El valor obtenido se utiliza para calcular la ubicación empleando referencias geométricas. La posición se puede conocer en forma de coordenadas polares o cartesianas; bien geográficas o relacionadas con algún punto conocido. Los objetos a localizar pueden ser de índoles muy diversas: un avión, un autobús urbano o rural y hasta un animal salvaje.

Cabe señalar que en México existe otra definición de radio localización que corresponde a los sistemas de "Paging". Estos sistemas reciben mensajes en ciertas oficinas y los envían a los usuarios del sistema a través de antenas o satélites, pero no se puede conocer la posición de cada uno, se les envía información mas no se les localiza.

Cuando se utilice el término localización a lo largo de esta tesis, se referirá al objetivo antes mencionado.

Utilizar un sistema de radio localización puede repercutir en un menor costo de operación, en proporcionar mayor seguridad y mejorar la eficiencia de ciertos sistemas.

Supóngase un servicio de radio taxis. Actualmente el proceso radica en esperar el reporte de alguna unidad libre que pueda cubrir la llamada solicitando servicio. Si en lugar de esto se destina la unidad libre más cercana al sitio donde ha sido requerida, el servicio al cliente se verá mejorado ya que el taxi llegará en menor tiempo. Para poder llevar a cabo esta operación, es necesario que la central decida quién debe ir, teniendo conocimiento de la distribución de su flotilla. Además de mejorar la eficiencia, se pueden obtener grandes ahorros, no sólo por el tiempo aprovechado, sino también de mantenimiento y gasto de combustible, ya que las distancias recorridas serán menores. La posibilidad de conocer la posición de cada unidad de la flotilla aumenta la seguridad en caso de que alguna sufra un accidente, sea robada o salga de su área correspondiente.

Para poder llevar a cabo un proceso de radio localización se utilizan diferentes tecnologías: satélites, radio y antenas, entre otras, las cuales se combinan de tal manera que se puede conocer la posición deseada.

Las necesidades del usuario determinarán la tecnología a utilizar, ya que cada una puede trabajar diferentes áreas de cobertura y niveles de precisión, no se usará la misma para una ruta fija de autobuses que para navegación marítima.

El tema de la radio localización no es nuevo, la primera tecnología fue desarrollada por los aliados durante la segunda guerra mundial y se conoce como RADAR. Sin embargo, la difusión que han tenido otros sistemas posteriores en nuestro país ha sido muy limitada. En la presente tesis realizará un análisis de las siguientes tecnologías existentes: LORAN (LONg RANGE Navigation), GPS (Global Positioning System), y Proximidad con el objeto de difundir su conocimiento y proporcionar al lector los elementos necesarios para poder elegir alguna de las tecnologías analizadas y conocer sus posibles aplicaciones en México. El RADAR (RADio Detection And Ranging) será brevemente analizado en el tercer capítulo por la gran importancia que posee a pesar de las limitaciones que tiene en las aplicaciones terrestres. No se analizarán sistemas de localización que no empleen de alguna manera enlaces de radio, ni sistemas y aplicaciones marítimos, aéreos y espaciales.

Los capítulos que se tratarán en este trabajo son los siguientes:

- I. Introducción: Qué es y para qué sirve la radio localización. Objetivos y acotaciones de la tesis.
- II. Importancia de la radio localización.

Resaltar la importancia que tiene la Radiolocalización.

Clasificar los sistemas de radio localización: servicios, informativo, con o sin comunicación. Citar ejemplos.

### III. Análisis de diversas tecnologías para radiolocalización con aplicabilidad en vehículos terrestres:

- Resumen de fenómenos de propagación.
- Funcionamiento y equipo, móvil e infraestructura de cada tecnología.

### IV. Consideraciones para la instalación:

- Precisión, área de cobertura, ventajas y desventajas.
- Comunicaciones: frecuencias y protocolos.

### V. Diseño de sistemas de radio localización.

Diseño de tres ejemplos, uno sobre cada tecnología, en los cuales se apliquen las tecnologías analizadas a lo largo de la tesis.

### VI. Conclusiones

### Apéndice. Programas para áreas de cobertura de LORAN

## CAPÍTULO 2

### IMPORTANCIA DE LA RADIOLOCALIZACIÓN

La radio localización existe desde la Segunda Guerra Mundial con la utilización de los sistemas de RADAR. Estos sistemas constituyeron la primera tecnología capaz de detectar la presencia de un objeto a distancia. Casi paralelo a éste, se desarrolló el LORAN por los Guarda Costas de los Estados Unidos y es utilizado en muchos lugares, si bien no con la difusión del RADAR. En la actualidad, sistemas más sofisticados permiten conocer con mayor precisión los cambios de posición de ciertos objetos y con áreas de cobertura mayores y que no dependen de la topografía.

Las aplicaciones que pueden tener los sistemas de radio localización se pueden dividir según la figura 2.1

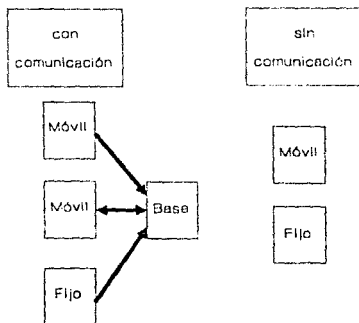


figura 2.1



Todos los sistemas deben de reportar los resultados obtenidos en algún momento, pero algunos de ellos envían sus valores de salida en forma automática y en algunas veces, en intervalos regulares a una base que utiliza estos datos para modificar las actividades en curso o como monitoreo de seguridad. Con base en lo anterior se dividen los sistemas en sistemas con comunicación y sin comunicación. Debe entenderse que las comunicaciones antes mencionadas no son las mismas que utiliza el sistema de radio localización para determinar la posición del objeto. Las situaciones que no requieren comunicación no utilizan el resultado para modificar el sistema durante el proceso de la localización. Los datos obtenidos se almacenan para ser analizados posteriormente o se utilizan aisladamente.

Un ejemplo de localización móvil sin comunicación es el empleado por un grupo de arqueólogos que trabaja en la zona maya entre México y Guatemala [2]. Ellos han utilizado un localizador GPS para obtener las coordenadas exactas de ubicación del edificio sobre el cual se encuentran. Con los valores obtenidos, pueden trazar sobre un mapa de la región la disposición de los monumentos que estén estudiando. De esta forma se mejoran los registros de sitios en zonas arqueológicas distantes, o donde la naturaleza hace difícil este trabajo, como selvas o desiertos.

Un sistema fijo se utiliza sobre los puentes, colocando localizadores en los extremos y centro del mismo, y después de cierto tiempo se miden los cambios de posición. Conociendo éstos se pueden obtener las elongaciones y compresiones que ha sufrido el puente en un cierto periodo de tiempo.

Otra aplicación de los sistemas móviles está en el rescate alpino o la búsqueda durante desastres naturales, como inundaciones o erupciones

volcánicas. La precisión de una referencia durante una búsqueda puede ser crucial, ya que si ésta es vaga y no puede ser ubicada con facilidad, el trabajo se verá entorpecido. Usando las coordenadas geográficas del punto en vez de señas particulares del lugar, como una casa o granja, un cerro, un árbol o el kilometraje de una carretera, la localización será más sencilla, y por lo tanto, el tiempo para llegar hasta ahí será mucho menor. Si el terreno en el que se tiene que llevar a cabo la localización no se encuentra sobre una área urbana o sobre un camino, se agrava la situación, ya que obtener referencias de distancia se vuelve más difícil.

Las aplicaciones que cuentan con comunicación pueden dividirse, en fijas y móviles, y además según el sistema de comunicación que utilicen. Este puede ser simplex, cuando solamente existe transmisión de información en un sentido, es decir, del punto a la base o viceversa, o duplex, si la transmisión se realiza en ambos sentidos. La información que se transmite a la base va a afectar de alguna manera el funcionamiento de estos sistemas, los cuales tienen un objetivo diferente a la pura obtención de la posición de los objetos de interés.

Una de las áreas en las que se puede encontrar aplicación en los sistemas móviles, es aquella en la que se busca el control de un grupo de automóviles en flotilla. Los camiones privados pueden ser mejor controlados en negocios como el transporte de mudanzas, en la minería, industrias madereras, petroleras o de pasajeros. Algunos de los aspectos que pueden ser mejorados gracias a este control son el desempeño de los conductores, los kilometrajes recorridos y la seguridad de la carga que se transporta.

Las ganancias que se obtengan a raíz de utilizar un nuevo sistema pueden solventar los gastos de inversión del servicio de radio localización adquirido. En algunos casos el número de unidades de la flotilla puede disminuirse ya que con un sistema de radio localización se puede prestarse el mismo servicio que antes se tenía, lo que repercutirá en una ganancia para la empresa.

Los autobuses urbanos y cualquier otro transporte de ruta fija pueden dar un mejor servicio de horarios y control de tráfico. Estos tienen que establecer el tiempo adecuado que deben ser espaciadas dos unidades en la misma ruta. Para determinar esto se deben analizar el tráfico de la ruta, la cantidad de pasajeros que requieren ser transportados y el número de unidades con que cuenta la compañía. Si la central que maneja los autobuses tiene conocimiento del punto exacto en el que se encuentran a lo largo del recorrido, puede determinar si la siguiente unidad que está por salir debe esperar un poco, o salir antes de lo previsto si la situación así lo amerita. Si una unidad se detiene durante su recorrido por una avería, se puede mandar otra para sustituirla, o bien un equipo de reparación si es que se ha descompuesto. También se tendrá una mayor seguridad, ya que es fácil saber cuando una unidad se desvía de la ruta preestablecida.

Los servicios que prestan la policía, los bomberos y ambulancias pueden ser mejorados utilizando sistemas de radio localización. Las ambulancias pueden salvar más vidas proporcionando a tiempo la ayuda necesaria o transportando a las personas a un hospital o clínica en menos tiempo. Los estragos de un incendio serán disminuidos si un equipo de bomberos se presenta en un tiempo menor en el lugar del suceso. La rapidez de los servicios que presta la policía puede ser un factor determinante en el momento de responder a una llamada de alarma.

Existen otras situaciones en las que no necesariamente se requiere de una disminución del tiempo de operación como servicio de emergencia, y también se utiliza la radio localización. Para llevar a cabo estudios en animales salvajes, se coloca en cada uno de ellos un localizador a través del cual veterinarios o biólogos pueden mantener conocimiento de los movimientos migratorios o de caza de cada animal sin necesidad de estar cerca de ellos. Esto permite mejores estudios en los cuales se sabe cuándo muere uno de los animales y dónde se encuentra [3].

Además de estos ejemplos existen muchos otros en los que pueden ser empleados sistemas de localización. Un caso similar al de los taxis y de los vehículos de la policía es el de la sección de automóviles de las compañías de seguros. Éstas deben de mandar un "ajustador" al lugar donde ha sucedido algún accidente. Para reducir el tiempo que tarda en llegar, el agente de seguros que debe dirigirse con el asegurado debe ser aquel que se encuentre más próximo. Para que esto sea posible de una manera óptima, es necesario que la oficina central conozca la ubicación de cada uno de los automóviles de la compañía.

Estas situaciones son algunas de las muchas que existen y muy pocas comparadas con las que pueden implementarse. A través de ellas se pretende resaltar la importancia que han tomado los sistemas de radio localización y sus aplicaciones, así como la que tendrán en un futuro cuando las tecnologías sean más utilizadas. También se intenta despertar el interés del lector e invitarlo a pensar en nuevas aplicaciones que puedan ser desarrolladas en nuestro país.

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS: RADAR, LORAN, GPS, PROXIMITY**

La característica común a todos los sistemas de radio localización es la utilización de ondas de radio, por lo que es necesario conocerlas para entender mejor el funcionamiento de cada técnica.

El desempeño de los enlaces de comunicaciones vía ondas de radio depende de la propagación que siga cada enlace y la propagación va de acuerdo con la longitud de onda de la señal. A continuación se presenta un pequeño resumen sobre los fenómenos de propagación de las ondas electromagnéticas y posteriormente el análisis de las tecnologías.

#### **PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS**

Se pueden marcar cuatro rangos de frecuencia aproximados. El primero son las frecuencias muy bajas que llegan hasta algunos kHz. Las longitudes de onda son muy grandes, del orden de  $10^5$  metros. La onda se refleja en la ionosfera y se propaga alrededor del globo en una especie de guía de onda que se forma entre la tierra y la atmósfera.

El segundo grupo va hasta unos cuantos MHz. La transmisión se ve fuertemente afectada por la superficie terrestre a través de la cual se propaga. Las ondas se pueden reflejar en las partes bajas de la ionosfera, pero el nivel de absorción es muy alto e igualmente las pérdidas.

El tercer rango llega hasta 30 ó 40 MHz. Las ondas de radio de esta banda se reflejan en la ionosfera y se forman brinco, en los cuales se recibe la transmisión, que pueden ser de miles de kilómetros. Las condiciones de propagación son variables por los cambios de noche y día, la densidad de electrones y temporadas anuales.

La cuarta sección incluye las frecuencias mayores. La longitud de onda de estas señales es pequeña (menores a 6 metros) y las antenas pueden colocarse a varias longitudes de onda sobre el nivel del piso. Los fenómenos de propagación involucrados son los reflejos de las ondas con la tierra y las líneas de vista. Estas señales penetran la ionosfera por lo que no hay reflejos con ella. Conforme la frecuencia aumenta, las pérdidas por lluvia, niebla, maleza, edificios, van aumentando (frecuencias mayores a algunos gigahertz).

La señal transmitida por las antenas se propaga por dos medios simultáneamente: por la tierra y por el aire. La propagación terrestre u onda de superficie, se presenta cuando se trabajan frecuencias en las bandas bajas, desde pocos kHz hasta algunos MHz, con longitudes de onda bastante grandes (desde kilómetros hasta decenas de metros). La onda electromagnética induce corrientes en las partículas de la tierra y se propaga a través de ésta. La onda de superficie se toma en cuenta solamente hasta aproximadamente una longitud de onda sobre la superficie terrestre en que se propaga ya que para alturas mayores las ondas espaciales son mayores en magnitud. Para que la antena tenga alta eficiencia en su radiación, debe medir un cuarto de la longitud de onda de la señal como mínimo, lo cual físicamente puede ser muy grande. Es por esta razón que las antenas están a nivel del piso o enterradas parcialmente.

La atenuación que se presenta en la propagación es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia que separa al emisor del receptor, por lo que las potencias utilizadas deben ser altas y oscilan entre 10 y 1000 kW. Las pérdidas se deben a la absorción de la superficie y a la difracción que va sufriendo la señal conforme se va desplazando.

### Propagación de la onda de superficie

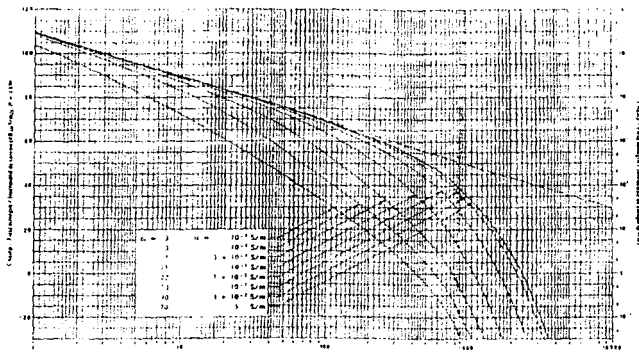


figura 3.1

Sobre la superficie del mar la atenuación es menor ya que la conductividad  $\sigma$  es mayor, y se puede recibir la señal a distancias mucho mayores [5]. La onda de superficie puede llegar a distancias de 900 km. propagándose en tierra y hasta 1400 km en el mar como se observa en la gráfica anterior.

La onda de superficie se mantiene constante dentro de ciertos márgenes sin importar la hora del día o época del año, a diferencia de las ondas que se propagan a través de la atmósfera, las cuales se ven afectadas también por las condiciones climatológicas.

Las ondas que se propagan en la atmósfera pueden ser de dos tipos: ondas ionosféricas o reflejadas y ondas espaciales.

Las ondas ionosféricas sufren transformaciones en la ionosfera, capa superior de la atmósfera. Esta capa recibe suficiente radiación solar para ionizar el aire y mantenerlo de esta manera durante cierto tiempo. La temperatura, densidad y composición tienen variaciones distribuidas heterogéneamente por estratos. Algunos de ellos se forman durante el día, y al ponerse el sol regresan a un estado homogéneo. La ionosfera suele sufrir cambios dependientes de las condiciones solares, además de los ya mencionados por la noche y el día. La radiación, los rayos ultravioleta, los efectos de la corona solar y otros fenómenos como las manchas solares varían a lo largo de períodos de 11 años aproximadamente. También hay cambios repentinos provocados por las protuberancias solares y se presentan más frecuentemente cuando el sol está en mayor actividad. Por supuesto, todos estos cambios solamente afectan a un lado de la tierra, el lado donde es de día.

Los efectos principales que ocasionan las capas ionosféricas en las ondas electromagnéticas son los siguientes: reflejan algunas de las ondas de VLF y LF, absorben MF y HF en cierto nivel y reflejan algunas de las ondas de HF y mayores. El nivel de absorción y reflexión está dictado por la constante dieléctrica [8] del medio según la fórmula:



$$\kappa = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0\omega(\omega - j\nu)} \quad (3.1)$$

donde  $m$  y  $e$  son la masa y la carga del electrón,  $N$  es la densidad de electrones por unidad de volumen,  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío,  $\nu$  es la frecuencia de colisión entre iones y moléculas, y  $\omega$  es la frecuencia de una onda. Cuando la densidad de electrones es suficiente para que  $\kappa=0$ , la propagación se detiene y la onda es reflejada. A menores frecuencias las colisiones producirán mayor absorción.

Las ondas que regresan a la tierra después de pasar a través de la ionosfera en realidad no siempre son reflejadas sino refractadas. Si se idealiza la ionosfera como una serie de capas (figura 3.2) cada una con diferente nivel de ionización se observa la refracción por cada cambio de capa.

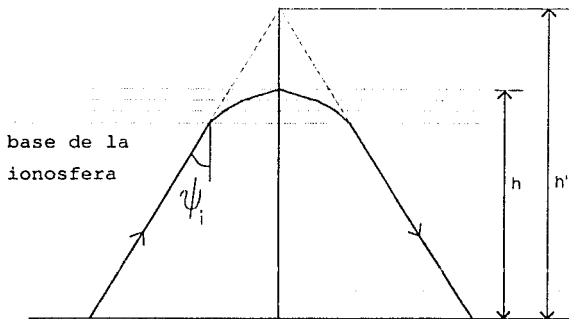


figura 3.2

Una onda que viaja entre dos medios distintos, sufre una variación en la dirección de su propagación obedeciendo la ley de Snell:

$$\text{sen } \psi_1 = \kappa_1 \text{ sen } \psi_1 = \kappa_2 \text{ sen } \psi_2 \dots \quad (3.2)$$

siendo  $\kappa_x$  la constante dieléctrica del medio. De esta manera, la onda va siendo desviada poco a poco y tras cambiar varias veces de dirección, regresa hacia la tierra, con el mismo ángulo de inclinación con el que llevaba mientras subía.

Si se reemplazara la ionosfera por una superficie totalmente reflectora, la onda seguiría la trayectoria discontinua de la figura 3.2. A la altura alcanzada por las líneas se le llama altura virtual ( $h'$ ) en contraposición a la real ( $h$ ).

El fenómeno de refracción también se presenta en las ondas espaciales que se propagan a través de la troposfera por el cambio en la constante dieléctrica, si bien la desviación producida en éstas es menor que en la ionosfera. El resultado es que la onda se propaga a lo largo de la curvatura terrestre. Si el cambio en la constante dieléctrica es lineal con respecto a la altura, la trayectoria debida a la refracción es la misma que si las ondas se propagaran en línea recta en una tierra con el radio modificado de la siguiente manera [18]:

$$a_e = ka = \frac{a}{1 + a/2 \, d\kappa/dh} \quad (3.3)$$

donde:  $a$  es radio real de la tierra

$k$  es el factor de ajuste y

$d\kappa/dh$  es la razón de cambio de  $\kappa$  con la altura.

Los valores típicos de  $k$  son los siguientes [17]:

Zona polar	entre 6/5 y 4/3
Zona templada	alrededor de 4/3
Zona cálida	entre 4/3 y 3/2

Las ondas espaciales no se reflejan en la ionosfera pero sí se reflejan en la superficie terrestre (figura 3.3).

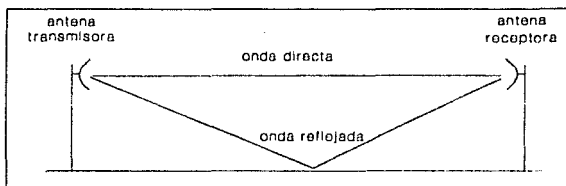


figura 3.3

La onda reflejada se suma a la onda directa y en la antena receptora se tiene:

$$E = E_D + E_r e^{-j\phi} \quad (3.4)$$

donde  $E_D$  es la amplitud de la onda directa  
 $E_r$  es la amplitud de la onda reflejada y  
 $e^{-j\phi}$  es el defasamiento provocado por el camino  
diferente que recorre la onda.

La curvatura de la tierra limita la distancia máxima posible, ya que se necesita una línea de vista entre la antena transmisora y la antena receptora. Esta

distancia será mayor que la línea de vista óptica por el factor  $k$  y se determina por el teorema de Pitágoras con referencia en la figura 3.4. Se considera que  $ka \gg h$  por lo que  $d \approx d'$

$$(ka + h)^2 = d^2 + (ka)^2 \quad (3.5)$$

$$d^2 = (ka)^2 + 2kahl + h^2 - (ka)^2 \quad (3.6)$$

y como  $2kahl \gg h^2$

$$d = \sqrt{2kahl} \quad (3.7)$$

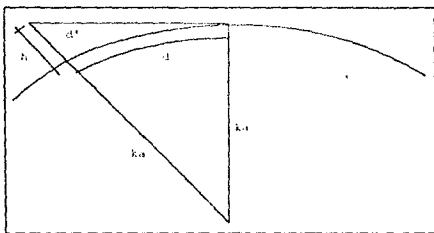


figura 3.4

Al colocar emisor y receptor sobre montañas o cerros, se puede aumentar la distancia de transmisión, pero normalmente ésta es menor a 100 km.

Los fenómenos atmosféricos como la lluvia, la niebla o el granizo también afectan la propagación de las señales. Las ondas electromagnéticas en un medio que no es el vacío se van a ver afectadas por la constante de

propagación  $\gamma$ , que es el factor que actúa como envolvente de la ecuación [15] de campo eléctrico de una onda

$$E_x(z) = E_m^+ e^{-\gamma z} + E_m^- e^{\gamma z} \quad (3.8)$$

La fórmula anterior solamente tiene componentes en el eje de  $z$  ya que se suponen cero sus componentes en  $x$  y  $y$ .  $E_m^{\pm}$  representa la amplitud de las ondas que viajan en sentido positivo y negativo de las  $z$ .

$\gamma$  está dado por:

$$\gamma = j\omega \sqrt{\mu(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega})} \quad (3.9)$$

donde:  $\mu$  es la permeabilidad magnética del medio [Wb/A/m],

$\sigma$  es la conductividad [S/m],

$\epsilon$  es la permitividad [C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>], y

$\omega$  es la frecuencia de la onda [Hz].

El siguiente análisis nos muestra que las unidades de  $\gamma$  son [m<sup>-1</sup>].

$$\text{Hz} \sqrt{\frac{\text{Wb}}{\text{Am}} \left( \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} - \frac{\text{S}}{\text{Hz}} \right)}$$

$$\Omega = V/A = \text{Js}/\text{C}^2$$

$$\text{S}/\text{Hz} = \text{s}/\Omega\text{m} = \text{C}^2/\text{Nm}^2$$

$$\text{Wb} = \text{Nm}/\text{A}$$

$$\text{Wb}/\text{Am}(\text{C}^2/\text{Nm}^2) = \text{C}^2/\text{A}^2\text{m}^2 = \text{s}^2/\text{m}^2$$

$$1/\text{s}[\text{s}/\text{m}] = \text{m}^{-1}$$

De esta ecuación se pueden separar las partes real e imaginaria de la siguiente manera:

$$\gamma = \alpha + j\beta \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (3.10)$$

donde  $\alpha$  es la parte real y se le conoce como constante de atenuación y  $\beta$  se le llama constante de fase, dependientes ambas de los parámetros del medio. El inverso de  $\alpha$  se conoce como  $\delta$  ó profundidad de penetración. Si se sustituye  $\gamma$  por sus componentes  $\alpha$  y  $\beta$  y se eleva al cuadrado para eliminar el factor imaginario se obtiene la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right]}} \text{ [m]} \quad (3.11)$$

El comportamiento de  $\delta$  con respecto a la frecuencia se muestra en la figura 3.5.

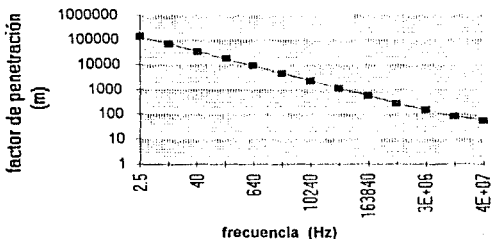


figura 3.5

La gráfica muestra cómo la profundidad de penetración de una señal electromagnética disminuye al aumentar su frecuencia. A una distancia  $\delta$  de donde fue emitida la onda, su amplitud habrá decaído hasta un valor  $e^{-1}$ , es decir, un 36.78% del valor inicial.

Para fines de localización, las ondas de superficie son muy confiables, ya que su propagación no depende de gran número de factores y puede ser más predecible que las ondas ionosféricas y espaciales, y no varía tampoco con la noche y el día.

## TECNOLOGÍAS DE RADIO LOCALIZACIÓN

### RADAR

El RADAR constituye la primera tecnología que fue capaz de señalar la presencia de un objeto a cierta distancia. En un principio se utilizó con fines bélicos para la detección de aviones, ya que éstos podían ser localizados en la oscuridad y a distancias grandes, mayores al rango visual. Posteriormente se ha utilizado con otros fines, como la navegación aérea y marítima, y la meteorología.

El principio de su funcionamiento es la reflexión que sufren los impulsos radio eléctricos con los objetos que se interpongan en su camino. Tomando en cuenta que los impulsos se propagan a una velocidad casi constante (la de la luz), se tiene que:

$$d = c * t \quad (3.12)$$

donde:  $d$  es la distancia a la cual se encuentra el objeto,  $t$  es el tiempo medido que transcurre entre la ida y el regreso de la señal al lugar donde fue enviada y  $c$  es la velocidad de la luz.

El equipo básico consiste en una radioemisora que transmite estos impulsos de corta duración con un ángulo de salida estrecho. La antena emisora puede funcionar también como receptora de las señales reflejadas si se efectúa un multiplexaje en el tiempo de ambas señales: transmitida y recibida. La dirección del objeto se conoce por la dirección en la cual fue emitido el impulso. Si se efectúa un barrido girando la antena, se tendrá conocimiento de la zona con una área de cobertura circular. La velocidad del objeto puede ser conocida midiendo las posiciones sucesivas de dos ecos consecutivos, o por medio del efecto Doppler y las variaciones en la frecuencia del haz electromagnético enviado. La figura 3.6 ilustra el principio básico de funcionamiento.

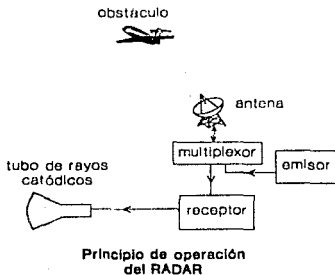


figura 3.6



La respuesta captada por la antena se puede visualizar de tres maneras. En dos de ellas, la información se envía a un tubo de rayos catódicos (TRC). La tercera se alimenta directamente a una computadora que se encarga de graficar los resultados.

La primera técnica consiste en efectuar un barrido a lo largo del TRC, modulando la deflexión del rayo en sentido vertical según las variaciones de la señal recibida, de la misma manera que trabaja un osciloscopio. Si no se recibe señal, se proyectará una línea recta horizontal, correspondiente a la ausencia de obstrucciones. La distancia a la que se encuentra el objeto detectado va a ser proporcional al intervalo de tiempo mostrado en la pantalla (figura 3.7). Las variaciones que se observan entre el pulso de referencia y el pulso del obstáculo son debidas al ruido recibido y amplificado por el sistema y se conocen como "pasto" por su forma.

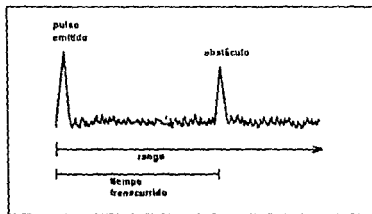


figura 3.7

La mayor desventaja de utilizar este sistema de proyección es que solamente se conoce un perfil de la zona, la dirección de la antena debe ser indicada de alguna otra forma.

Si el TRC se modula en intensidad de tal manera que cuando la señal es alimentada, ésta se presenta en la pantalla como puntos luminosos correspondientes a los obstáculos. (figura 3.8)

La distancia a la que aparecen los puntos con respecto al centro de la pantalla es proporcional a la distancia entre la estación de RADAR y los objetos. El barrido se efectúa en forma circular y la dirección que tiene la antena en un instante se muestra por una línea radial. Para que la imagen permanezca en la pantalla durante cada periodo de barrido, se utilizan materiales que tengan una atenuación lenta. A este sistema se le llama indicador de plano y posición o PPI (Plan-position indicator).

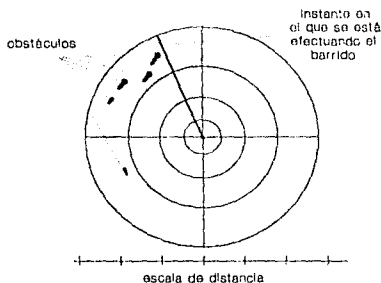


figura 3.8

La tecnología del RADAR tiene como ventaja sobre otros sistemas la posibilidad de detectar cualquier objeto que se encuentre en su rango, sin la necesidad de que el objeto cuente con alguna instrumentación especial. Sin

embargo, para aplicaciones terrestres el RADAR no suele ser utilizado ya que necesita una línea de vista con el objeto. Pensando en una zona urbana se puede comprender fácilmente que no es utilizable para fines de localización de vehículos. Una de las aplicaciones terrestres que se ha encontrado es el detector de velocidad o "pistola de RADAR" que se utiliza por la policía para medir la velocidad de los automóviles en curso, o por los equipos de "baseball" para conocer la velocidad a la que están lanzado la pelota.

Estos sistema de RADAR utilizan el principio básico pero con ciertas diferencias. Se emite una onda continua en lugar de pulsos y la respuesta que se recibe habrá variado su frecuencia original, dependiendo de la velocidad del objeto con el que haya chocado. A estos sistemas se les llama RADAR Doppler de onda continua.

Estos sistemas consumen una potencia más baja y son menores y más sencillos que los que utilizan pulsos, pero no han sido muy utilizados ya que no pueden medir la distancia al objeto. Esto se debe a que la onda no es modulada y en el momento de recepción no se puede saber hace cuánto fue emitida [6].

## LORAN

El LORAN es un sistema de localización desarrollado por los Guarda Costas de los Estados Unidos en la década de los treinta. Después de varios años de experimentación, se concretó la configuración que se emplea hoy en día llamada LORAN-C, la cual presta servicio a cerca de un millón de usuarios marítimos, aéreos y terrestres [20]. Ésta utiliza tres antenas (configuración básica) que transmiten pulsos en la banda de baja frecuencia (LF) y permite

determinar la posición de un objeto, en relación con otros usuarios o con un punto de referencia fijo. La palabra LORAN viene de las iniciales en inglés de LOnG RAnge Navigation, ya que fue creado como un apoyo para la navegación a largas distancias.

El principio de funcionamiento es similar al RADAR. Las señales electromagnéticas al propagarse en la superficie terrestre casi no varían su velocidad. La distancia entre un emisor y un receptor se puede conocer midiendo el tiempo que tarda la onda entre ellos y multiplicándolo por la velocidad de propagación. Esta longitud representa el radio de una circunferencia, con centro en el emisor, sobre la cual se puede encontrar el receptor. Si se utilizan dos antenas más, la posición exacta del receptor puede ser calculada encontrando las intersecciones de las tres circunferencias. Para poder utilizar este método es necesario que las señales hayan sido emitidas simultáneamente y conocer el instante de emisión, o bien conocer los momentos en que fueron emitidas y recibidas cada una. Un equipo capaz de medir estos tiempos de manera precisa resulta demasiado complicado y costoso, por lo cual este método ha tenido poca aplicación.

Si en lugar de medir el tiempo transcurrido, se miden las diferencias de tiempo de los tres transmisores en el receptor, el problema se simplifica. Los transmisores, en lugar de ser los centros de tres círculos, se convierten en los focos de tres hipérbolas que se intersectan en el receptor. Una de las combinaciones entre transmisores no se utiliza ya que dos hipérbolas son suficientes para determinar la posición.

En la figura 3.9 se ven dos familias de hipérbolas que se localizan sobre dos de las tres líneas existentes entre las antenas. La figura de un automóvil se

encuentra en la intersección de las dos hipérbolas correspondientes a las diferencias de tiempo entre las antenas.

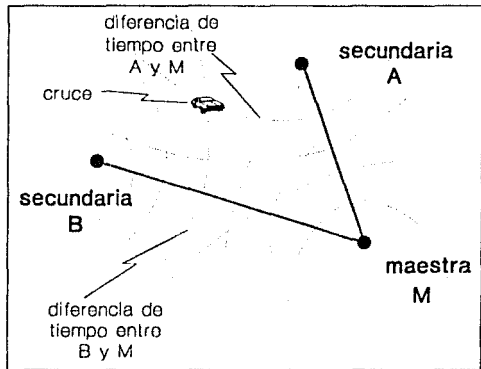


figura 3.9

Las estaciones de transmisión LORAN se colocan en grupos de tres a seis, donde una de ellas funciona como antena maestra y las demás como secundarias. Cada estación secundaria emite un grupo de 8 pulsos de  $200 \mu\text{s}$  aproximadamente con una frecuencia central de  $100 \text{ kHz}$ . Los pulsos son modulados en amplitud por la siguiente ecuación:

$$f(t) = At^2 e^{-\frac{t}{32T}} \quad (3.13)$$

donde:  $A$  es la potencia de salida y

t es el tiempo transcurrido en microsegundos.

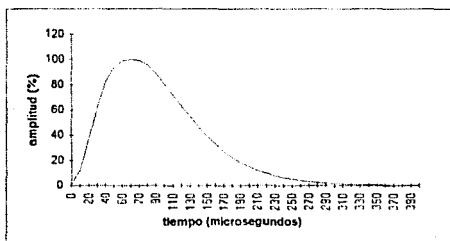


figura 3.10

El valor máximo de la envolvente es a los 65  $\mu$ s y a los 318 ms pasa por debajo del 1%. La forma de onda del pulso (figura 3.10) permite que la mayor parte de la potencia emitida se conserve entre 90 y 110 kHz, lo que representa una banda pequeña del espectro [4].

El primer grupo de pulsos que se detecta es el correspondiente a la antena maestra y se distingue por tener un pulso extra. Después de este grupo, se detectan ocho más correspondientes a una de las secundarias. El tiempo entre el primer pulso de cada serie es la diferencia de tiempo que se utilizará para determinar las hipérbolas, o líneas de posición (LOP). La posición de las antenas se conoce al igual que el retraso de cada una de las secundarias respecto a la maestra y por tanto el receptor puede generar las dos líneas de posición. La intersección de dos líneas de posición definirá la ubicación del receptor.

Para evitar el traslape de las señales recibidas en cualquier punto dentro del área de cobertura, las estaciones secundarias retrasan su emisión con respecto a la maestra un intervalo determinado. Este valor está en función del número de secundarias en el grupo, de la separación entre antenas y de la frecuencia de repetición de todo el grupo. Estos retrasos son de 23 a 100 ms para que el intervalo de repetición sea de 10 Hz como límite. Los transmisores cuentan con un reloj controlado por osciladores de cesio que se mantiene en constante sincronización.

El pulso que viaja por onda de superficie recorre un camino más corto que el de la onda ionosférica por lo que llega antes al receptor. La diferencia de tiempo es aproximadamente 40  $\mu$ s cuando el receptor está cerca de la antena y aumenta conforme se aleja. Esta diferencia permite reconocer ambos pulsos y utilizar solamente el que viaja por onda de superficie ya que es más confiable.

La antena que utilizan los Guarda Costas para la transmisión es vertical, lineal y de monopolo. La mínima potencia pico radiada es de 200 kW. La altura del mástil para situar la antena y la resistencia de ésta se eligen dependiendo del área que se quiera cubrir y la potencia que se utilizará. Los valores típicos son entre 100 y 200 metros y 1.4 a 4 ohms respectivamente.

El equipo móvil debe constar de una antena, un receptor para las señales de LORAN, un procesador de datos para determinar la posición y un transmisor-receptor. Puede contar con un sistema de despliegue el cual es muy utilizado en aplicaciones marítimas. La antena mide entre 1 y 2 metros y cuenta con acopladores de impedancia y filtros para eliminar interferencia externa. El procesador debe poder almacenar los resultados obtenidos hasta que éstos sean utilizados o comunicados vía radio a una central y también demodular y

decodificar los mensajes transmitidos desde la base. El transmisor-receptor de radio asociado, por lo general es de banda angosta y transmite en FM en UHF o VHF, independiente del sistema de recepción del pulso de LORAN.

La base necesita un receptor de LORAN y un sistema de radio FM transmisor-receptor, como el del equipo móvil, procesador de datos y sistema de despliegue. El receptor LORAN se utiliza para medir las diferencias de tiempo que usan todos los receptores móviles para determinar las variaciones en ellas y así poder calcular correcciones temporales de posición. El radio permite interactuar desde la base con los receptores y así ejercer un control remoto sobre ellos. El procesador de datos se encarga de localizar los datos sobre una referencia geográfica, como un mapa terrestre o de calles. El método más sencillo es mostrar las posiciones por medio de un tubo de rayos catódicos, de la misma manera que lo hace un RADAR sobreponiéndolos en el mapa correspondiente.

#### PROXIMITY:

Los sistemas de cercanía trabajan bajo el principio de navegación por referencias fijas, similar al principio de navegación por cabotaje, donde se utilizan como referencias puntos conocidos en la costa a lo largo de la cual se navega. Los puntos fijos son dispositivos que emiten o reciben señales de radio e interactúan con los vehículos que se desplazan frente a ellos. Estos dispositivos se colocan estratégicamente a lo largo de la ruta o área que se quiera cubrir. La precisión del sistema depende del espacio que se deje entre los dispositivos, conocidos como postes de dirección, por lo que podrá ser



ajustada según las necesidades del usuario del sistema. El intercambio de información entre los puntos fijo y móvil permite conocer la ubicación.

Un sistema de localización proximity es el método más sencillo y más barato que se puede implantar para un sistema de ruta fija [7]. Para sistemas con rutas variables la cantidad de señalizaciones que se deben utilizar resulta demasiado elevado y por ende muy costoso.

Existen diferentes tipos de sistemas. Uno de ellos utiliza un vehículo que constantemente está emitiendo una señal codificada, con baja potencia. Cuando ésta es recibida por uno de los postes, éste se comunica con la estación central para informar qué vehículo se encuentra en su proximidad. Una computadora se encarga de determinar la posición según el poste donde fue recibida la señal del vehículo.

Una desventaja de este método es que un determinado número de móviles cercanos pueden crearse interferencia mutuamente. Este tipo de sistemas se utiliza para identificación de vehículos más que para su localización. La identificación se puede instalar en casetas de cobro automáticas o estacionamientos. En lugar de utilizar un sistema manual, se lleva a cabo la identificación del vehículo, se agrega la cantidad a cobrar y posteriormente se le manda un recibo de pago [9].

Otra opción es utilizar los postes como transmisores en lugar de receptores. Cada poste transmite una señal codificada y única que le permite ser identificado. Los vehículos deben contar con un receptor y un equipo de decodificación para poder determinar cuál es el poste más cercano a su posición. En este caso, la central debe recibir la información del vehículo cada determinado tiempo para seguir su ruta.

Un último sistema utiliza una "barda electrónica", que se encarga de detectar si un móvil cruza entre dos secciones limitadas por la barda, así se puede saber en que zona de cobertura se encuentra [10].

Estos sistemas pueden funcionar de dos maneras con respecto al manejo de los datos: directamente, cuando los datos son transmitidos a la central desde los vehículos en movimiento, o indirectamente cuando los receptores fijos se encargan de mandar los datos recibidos de los móviles. Una variación de los sistemas consiste en utilizar reflectores semiactivos que emitan un patrón característico al ser radiados por una fuente determinada.

En un sistema directo, los transmisores pueden ser distribuidos en la zona de interés, cada uno con una señal codificada que les permita ser identificados. La potencia radiada es la necesaria para que exista continuidad en la recepción de un poste a otro. Esto está en función directa de las pérdidas que sufra la señal y de la interferencia que exista en la zona. Cada vehículo debe de contar con una antena, un receptor sintonizado a la frecuencia del sistema y un detector para medir el nivel de la señal, este puede ser de uno o varios niveles, para determinar si se encuentra entre dos transmisores. La posición se determina analizando la atenuación de la onda según la distancia. Un decodificador determina el transmisor específico del que se está recibiendo una señal. La identificación del transmisor y del receptor (vehículo) se envían a la central por medio de un enlace de radio independiente.

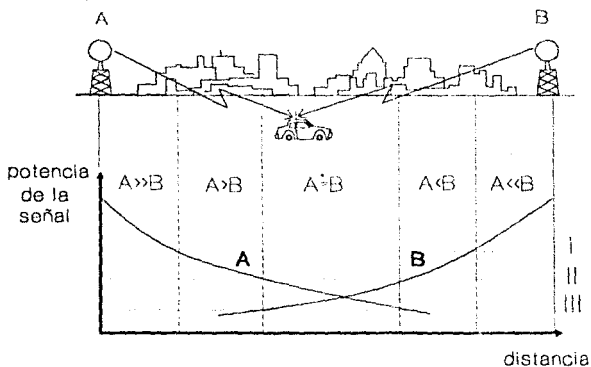


FIGURA 3.11

Si el detector es multinivel, va a estar recibiendo constantemente varias señales y comparando sus niveles para determinar si se encuentra en zonas cercanas a un transmisor, o bien entre dos de ellos.

En la figura anterior se muestra un sistema multinivel. Las líneas punteadas representan los umbrales del detector, las líneas discontinuas marcan los límites de las zonas que dependen de la potencia de la señal recibida.

El detector se encarga de determinar la zona en la que se encuentra el vehículo haciendo las siguientes comparaciones:

1. Si cualquiera de las señales rebasa el umbral I, se encuentra cerca de la antena correspondiente, es decir, zona  $A \gg B$  ó  $A \ll B$ .

2. Si la diferencia entre las señales es mayor que cierto valor preestablecido (nivel II- nivel III en este caso), la zona es de transición,  $A > B$  ó  $A < B$ .
3. Si la diferencia es menor que el valor, las dos señales se encuentran en los mismos niveles, es decir, un punto intermedio entre las antenas:  $A \approx B$ .

En cualquier configuración es importante reducir el consumo de energía del equipo fijo, ya que por lo general se alimentará por baterías. Una forma de lograr este ahorro, es utilizar reflectores semiactivos en los postes fijos que funcionan modulando una señal recibida con un código especial y reflejándola al vehículo, solamente cuando reciben la frecuencia para la que están diseñados. La onda a utilizar debe de ser de frecuencia alta (8 a 10 GHz) de tal manera que no se propague sino por línea de vista y no se difunda alrededor de varias cuadras. Otra ventaja de la frecuencia alta es la posibilidad de utilizar antenas pequeñas y de alta ganancia, más difícil con bajas frecuencias.

La señal reflejada se decodifica, se compara con la frecuencia enviada, se revisa la paridad del mensaje y se mide un valor de umbral para poder diferenciar ruidos e interferencia. Una vez recibida la información, se almacena en el vehículo que se comunica con la central mandando la identificación del poste y la suya en una sola señal.

La potencia utilizada en los reflectores oscila en los 100 mW y así el consumo de potencia es del orden de  $\mu W$ . La vida media de las baterías de los reflectores es de varios años y además la instalación es simple y barata, al no tener que contar con un suministro de energía. Un lugar ideal para colocar los reflectores es en los postes de luz o de teléfono [7].

## GPS:

El GPS (Global Positioning System) es un sistema de posicionamiento global, que utiliza una constelación de satélites para tener una cobertura de todo el planeta, en forma continua y con gran precisión. El GPS se divide en tres segmentos: espacial, del usuario y el de control en tierra como se ve en la figura 3.12.

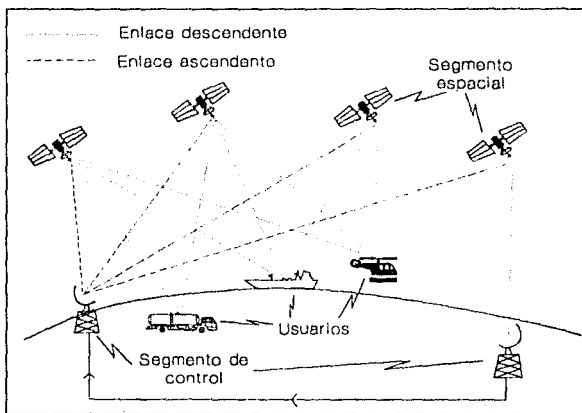


figura 3.12

El segmento espacial consta de una constelación de 18 satélites y tres de reserva en órbitas no síncronas de 20,000 km de altitud. Los satélites utilizados

pesan 845 kg. y tienen paneles de celdas solares que miden 7.2 metros. Se espera una vida útil de 7 años y medio. El número ideal de satélites es 24 pero por razones económicas se redujo a 21. La constelación estará configurada en seis planos de  $55^\circ$ , cada uno con 3 satélites [21]. Esto implica que es posible tener una línea de vista directa a cualquier punto sobre la tierra desde por lo menos cuatro satélites. Ópticamente, el satélite desaparece de la vista en un instante, pero eléctricamente su señal se va atenuando poco a poco debido a las características de la antena receptora y a los fenómenos de ocultamiento y de alteraciones que se sufren en las troposfera y en la ionosfera. Por estas razones se considera que los satélites que se encuentren abajo de cierto ángulo no deben ser tomados en cuenta. A este ángulo se le llama ángulo de margen (mask angle).

Para poder fijar un punto y obtener la información de su posición (longitud, latitud y altura), los satélites emiten una señal codificada que contiene información para determinar la distancia hasta el receptor y la posición del satélite en el momento de la emisión. Tres de los satélites determinan tres esferas centradas en ellos mismos que se intersectan en el receptor. En el proceso de medición también es necesario conocer el momento de recepción de la señal, lo cual es posible gracias a la información del cuarto satélite. Si se conoce con exactitud la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra el receptor, se puede determinar la posición con la información de tres satélites solamente.

Las ondas de transmisión son dos frecuencias en la banda L, cuyos límites son 1 y 2 GHz. Las señales consisten en un código de precisión (P) y un código de adquisición degradada (C/A). Ambos son secuencias digitales pseudo aleatorias utilizadas para medir distancias. Las señales también llevan

un mensaje de navegación que contiene la posición del satélite, su reloj, los datos de corrección para la propagación atmosférica y otra información utilizada por la sección de control. La transmisión por medio de dos frecuencias permite a los usuarios corregir errores por retardos en la propagación.

Todas las transmisiones se obtienen de la frecuencia fundamental de los relojes que se llevan a bordo, 10.23 MHz. De aquí se obtienen las frecuencias  $L1 = 1575.42$  MHz y  $L2 = 1227.60$  MHz.

El código P, de alta precisión, se restringe para usos militares de los Estados Unidos, sus aliados y aplicaciones que sean de interés nacional. Su estructura es de un ruido pseudo aleatorio que no se repite por 37 semanas. Así los satélites son distinguibles ya que cada uno transmite una porción del código totalmente diferente, algunas porciones no son utilizadas. Cada semana se inicializan todos los códigos en la medianoche del sábado al domingo. Este código está encriptado.

El código C/A es de acceso abierto y se degrada intencionalmente introduciendo errores en los valores de los relojes. La duración es de 1 ms y cada satélite transmite códigos C/A mutuamente exclusivos para hacerlos distinguibles, se transmiten en la banda L1.

Los efectos relativísticos tienen importancia ya que los relojes de los satélites trabajan más rápido que aquellos en tierra a razón de  $38.3 \mu\text{s}$  por día. Esta variación puede ser fácilmente corregida modificando la frecuencia fundamental unos cuantos milihertz.

El segmento de control en la tierra tiene cuatro estaciones de monitoreo que se encuentran en Guam, Alaska, Hawái y la base de la Fuerza Aérea de

Vandenberg en California, donde está el centro de control maestro. Los monitores registran las señales de los satélites conforme van siendo visibles para ellos. El centro de control reúne los datos y genera un mensaje de navegación para cada satélite que se envía a diario a través de un enlace por la banda S. De esta manera los satélites son capaces de radiar una señal precisa de su posición en función del tiempo.

El segmento de los usuarios está formado por aplicaciones marítimas, aéreas y terrestres, tanto militares como civiles que cuentan con receptor y procesador de GPS capaz de rastrear las señales de cuatro satélites, ya sea secuencial o simultáneamente. Parte del trabajo radica en seleccionar cuáles cuatro satélites registrar para llevar a un nivel óptimo la precisión. La posición del usuario se obtiene midiendo las diferencias de tiempo de llegada de las posiciones puntuales de los satélites. Las posiciones están definidas por el mensaje enviado en el código C/A transmitido.

La identificación de la posición: latitud, longitud altitud y desplazamiento en el reloj del usuario, es posible a través de cuatro mediciones de tiempos de llegada. La velocidad se calcula por la variación en la frecuencia de la portadora debida al efecto Doppler.

Han sido desarrollados cuatro tipos de equipo de usuario para la recepción de las señales: Equipo X, Equipo Y, Equipo Z, y portátil.

El Equipo X, o continuo, se utiliza en aplicaciones donde se espera mucha interferencia y los desplazamientos son rápidos. Se captan los cuatro satélites simultáneamente y la información de velocidad y posición se proveen de manera continua. El equipo está diseñado para trabajar con dos antenas donde la atenuación es severa. Cuenta con cuatro canales portadores.



Equipo Y o secuencial es un equipo más sencillo que el X, a nivel procesamiento, precisión, y sólo cuenta con un canal. Se utiliza cuando no se espera el mismo nivel de movimiento y de interferencia. Para obtener una lectura es tres veces más lento.

El equipo Z es de bajo costo y diseñado para uso civil. Tiene un receptor secuencial como el del Y pero solamente capta la portadora L1 y el código C/A. Para poder obtener un costo bajo se sacrifica calidad. La precisión en el valor de distancia al satélite será de 60 metros, mientras que el equipo X es de 6 y es muy vulnerable a la interferencia.

El equipo portátil está diseñado para poder ser transportado con facilidad. Pesa 12 kg, utiliza 27 watts y la velocidad a la que puede trabajar es menor a 30 metros por segundo. Utiliza un solo canal y recibe la información secuencialmente, puede usar los códigos C/A y P.

Las características más importantes de este sistema son su gran precisión para determinar velocidades y posición, cobertura global, disponibilidad en cualquier clima y continua, número ilimitado de usuarios y sin costo para ellos.

## CAPÍTULO IV

### CONSIDERACIONES PARA LA UTILIZACIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DE RADIO LOCALIZACIÓN

La elección de un sistema de radio localización depende de varios factores. Se deben considerar las ventajas y desventajas de cada tecnología para las características de la situación en la cual se vaya a aplicar.

A continuación se presentan algunos de los puntos importantes a considerar para cada uno de los sistemas analizados.

**DESEMPEÑO:** precisión, cobertura y número de usuarios.

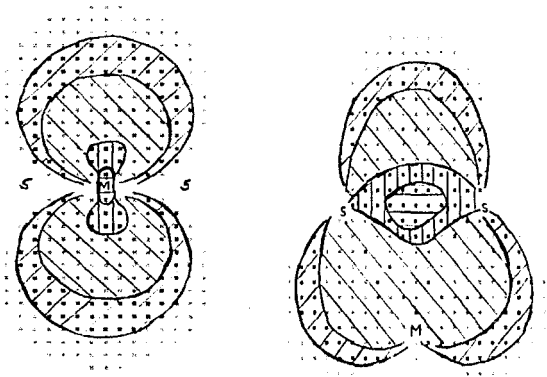
#### LORAN

La precisión del sistema LORAN está limitada por varias fuentes de error, de las cuales el ruido atmosférico producido por las descargas eléctricas es el más importante. Para combatirlo, se colocan en el receptor elementos de procesamiento no lineal que limitan los picos característicos de los rayos. El ruido eléctrico producido por el hombre también debe tomarse en cuenta, éste se minimiza utilizando filtros a la entrada de la señal. La precisión alcanzable a pesar de todos los ruidos, naturales y artificiales, limita a LORAN a decenas de metros [5].

Para conocer el área de cobertura en un sistema LORAN-C se desarrolló un programa que determina el área de cobertura. El programa tiene como base el análisis de error presentado por Skomal [4] en el capítulo de Sistemas

Hiperbólicos. Una vez que se eligen las posiciones de las antenas se evalúa el error de precisión punto a punto y se determina el área de cobertura por los rangos de error obtenidos.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran dos ejemplos de coberturas del sistema LORAN-C. En el primero se ubicaron las antenas sobre una línea horizontal. La central en medio y las secundarias, a distancias iguales, una a la derecha y otra a la izquierda. En el segundo las antenas se colocaron en forma de "V", con la maestra en el vértice inferior, y las secundarias en los extremos.



figuras 4.1 y 4.2

El área de cobertura está representada por los puntos de varias tonalidades. Cada cambio en la tonalidad de los puntos representa una variación en el valor del error geométrico.

Para mostrar en forma más clara en esta tesis los diferentes valores (ya que en la computadora los puntos son de distintos colores), se utilizarán rayados horizontales, verticales, inclinados hacia la izquierda, a la derecha y sin rayas conforme vaya aumentando el valor del error.

Es conveniente resaltar que la disposición geométrica de las antenas es sumamente importante. Si se cambia la posición de una de las secundarias o de la maestra, el área de cobertura se verá modificada. La diferencia entre las dos figuras es clara.

Aun conociendo el algoritmo del programa es necesario llevar a cabo varias pruebas para obtener la mejor disposición de las antenas, sobre todo cuando se trata de más de tres, ya que el área final es la superposición de las áreas obtenidas para tres antenas solamente.

El número de usuarios es ilimitado dentro del área de cobertura ya que las señales pueden ser recibidas por cualquier receptor.

Los programas desarrollados y su descripción se presentan en el Apéndice A.

## PROXIMITY

Los sistemas proximity o de cercanía pueden ser bastante económicos con respecto a otras tecnologías de localización. Sin embargo, tienen como

desventaja que el costo del equipo fijo se va incrementando conforme aumenta el área de cobertura o la precisión. Así mismo, solamente se puede trabajar a lo largo de una ruta fija. Es fácil detectar si un móvil ha salido de su ruta, pero no es posible conocer su nueva dirección. Esta desventaja debe considerarse si es que la tecnología se va a utilizar como medida de seguridad.

En estos sistemas, el error de posición no depende de la ubicación del vehículo mientras se encuentra en movimiento, a menos que exista una fuente de ruido cerca del punto fijo, o que la superficie cause distorsiones en la propagación de la señal. Las fuentes de error importantes son las intrínsecas al instrumental utilizado. La propagación de las ondas pasa a un segundo plano dadas las distancias relativamente pequeñas a través de las cuales se desplaza la onda.

Estas particularidades hacen que estos sistemas sean bastante confiables ya que las señales electromagnéticas no se ven tan afectadas por los fenómenos atmosféricos. También se tiene que la ruta de propagación no varía desde que se instala, a menos que alguno de los postes fijos sea afectado por una situación anormal, como ocurre cuando hay un cambio en la posición de alguno de los postes fijos en el caso de un choque. En estos casos la reparación del equipo resulta bastante sencilla y económica comparada con otros sistemas.

Por sus características, proximity se utiliza como complemento a otros sistemas de localización, los cuales utilizan la información proporcionada para inicializar el sistema, o bien en regiones donde el error es muy grande.

## GPS

El GPS tiene una gran ventaja sobre todas las otras tecnologías por su cobertura global debida al uso de satélites. Configuraciones anteriores como el TRANSIT que solamente contaba con seis satélites no podían dar lecturas de la misma precisión ni con la misma velocidad que el GPS. Al igual que LORAN, GPS permite que un número ilimitado de usuarios reciba las señales necesarias para poder calcular su propia posición. Las áreas de trabajo que pueden ser consideradas son mucho mayores que las de cualquier otra tecnología.

Las desventajas de este sistema son varias y deben ser tomadas en cuenta antes de considerar su utilización.

La localización necesita de cuatro señales para calcular la posición, esto no es difícil de lograr en áreas abiertas como el campo o carreteras, pero por las características de propagación de la señal del GPS pueden haber problemas debajo de puentes, donde la señal de varios satélites se atenúa considerablemente. Inclusive, vehículos de gran tamaño que se muevan al lado del receptor pueden actuar como espejo o blindaje para la señal. En las ciudades, la atenuación a causa de los edificios aumenta considerablemente. La vegetación también causa atenuación en la onda.

La obtención de la información de los satélites no es continua, ya que cada cuarenta minutos en cuatro lugares de la tierra se tiene que los satélites seleccionados son coplanares o simétricos con respecto al plano vertical del receptor, lo que impide tener un valor de posición confiable [11]. En un sistema que requiera no sólo de precisión sino de seguridad, este problema puede ser grave ya que aproximadamente el 5% de las lecturas no proporcionan la ubicación exacta del receptor.

Si llegara a faltar un satélite, las situaciones de coplanaridad y simetría serían más frecuentes en más lugares. Así, durante el tiempo en que una de las unidades de reserva se lleva hasta la posición donde reemplazará al satélite averiado, la continuidad de las señales será aún menos confiable. El tiempo en que se debe informar a los usuarios que una de las señales no debe ser considerada debe ser el menor posible. El tiempo que requiere el sistema GPS para informar a sus usuarios que una de las señales no debe ser tomada en cuenta es de 90 minutos, un lapso muy grande para trabajar con valores erróneos.

Es muy importante considerar que el sistema GPS ha sido desarrollado y operado por el Departamento de la Defensa de los Estados Unidos de América (existe un sistema similar llamado GLONASS desarrollado por la ex-URSS). Mientras no exista un cargo por la utilización de las señales, los gastos de operación y de instalación están a cargo de los Estados Unidos. Esta situación de servicio gratuito puede cambiar dentro de algún tiempo, ya que es posible que en poco tiempo otros países comiencen a producir equipo de recepción y a utilizar las señales sin ingreso económico alguno para los Estados Unidos.

Por otra parte, los países que deseen utilizar esta tecnología con fines estratégicos, deben tomar en cuenta que la operación de GPS está en manos única y exclusivamente de los Estados Unidos.

## **COMUNICACIONES**

Si el sistema de radio localización que se desea instalar se va a comunicar con una estación central, es importante determinar qué clase de

equipo se debe utilizar y las frecuencias en las que transmitirá. Por lo general se trata de receptores-transmisores que utilizan una banda angosta de UHF o VHF con FM. La frecuencia en la que transmiten varía entre decenas de MHz hasta unos cuantos GHz. Las características de propagación para estos tipos de radio cuando son móviles difieren de las de los sistemas de radio fijos. Los principales puntos a considerar son la altura de la antena, que en automóviles y camiones es considerablemente más baja (entre 1 y 3 metros sobre el nivel del piso), y las rutas de propagación que están en constante variación mientras el vehículo se encuentre en movimiento.

La cobertura de la señal va a depender en gran parte de la frecuencia que se utilice y de las características del terreno. Los experimentos de Okumura [14] sobre la atenuación de una onda electromagnética son similares al inverso de  $\delta$  de la figura 3.5. Las curvas de resultados fueron obtenidos en forma estadística dadas las variaciones obtenidas en mediciones experimentales.

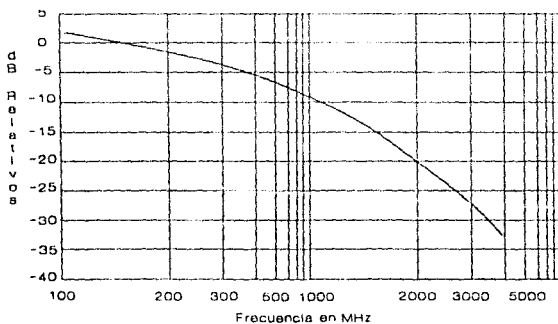


figura 4.3



En [14] se muestra un método para obtener áreas de cobertura a través de curvas equipotenciales, dependiendo de la potencia, la frecuencia y varios factores de corrección por las características del terreno: área urbana, suburbana o rural, depresiones, colinas o montañas en la zona, o propagación sobre superficie marina.

Además de estos resultados es importante considerar los experimentos de Young [12], realizados con transmisiones a varias frecuencias.

La gráfica mostrada en la figura 4.3 representa los valores promedio de la señal recibida en diferentes puntos de un medio suburbano. Se utilizó la misma potencia de transmisión para todas las frecuencias y como referencia el valor recibido con 150 MHz.

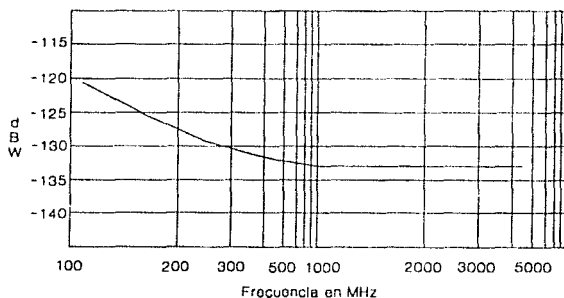


figura 4.4

Se puede notar que la potencia de la señal recibida disminuye con la frecuencia. Sin embargo, además de esto hay que tomar en cuenta la potencia necesaria en el receptor para superar el nivel de ruido. Este valor también varía con la frecuencia en la forma que se muestra en la figura 4.4.

El valor promedio de la señal para superar el ruido existente se comporta de manera diferente a la figura 4.3. La potencia necesaria disminuye conforme aumenta la frecuencia utilizada en la transmisión.

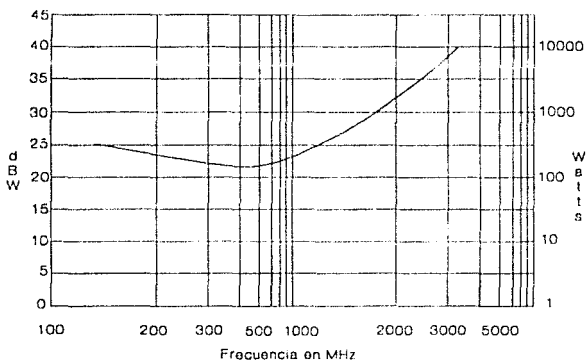


Figura 4.5

La potencia de transmisión que deberá ser radiada para que a diferentes frecuencias se pueda tener la misma potencia en los receptores, se obtiene combinando los resultados de las dos gráficas anteriores. La figura 4.5 muestra

la potencia requerida para conseguir los mismos resultados que con un transmisor a 150 MHz y 250 watts utilizando una antena de dipolo.

Los resultados muestran que el valor óptimo para transmitir se encuentra entre 400 y 500 MHz. Los valores de potencia para frecuencias arriba de 1000 MHz aumentan rápidamente. Aun así, frecuencias como 900 MHz son mejores que 150 MHz.

## **PROTOCOLOS**

Un protocolo es un conjunto de reglas que deben ser seguidas por dos sujetos que deseen comunicarse para poder hacerlo satisfactoriamente.

Cuando varios usuarios tienen la necesidad de enviar alguna información a la central, es necesario que cada uno de ellos cuente con un medio de comunicación y para ello será necesario compartir los recursos con que se cuenten, un canal de radio en este caso. Los protocolos surgen como una necesidad de controlar el acceso a dicho canal de comunicaciones y distribuir la capacidad del canal entre los usuarios.

La organización se debe llevar a cabo a través del mismo canal, por lo que el tiempo necesario para que una señal emitida por un usuario cualquiera sea recibida por otro usuario (tiempo de propagación), es sumamente importante para el diseño. Esto se hace patente al tomar en cuenta la diferencia de tiempo que se puede tener entre un sistema de radio y un sistema de satélite. Para el primero los valores son del orden de microsegundos y para el segundo

pueden llegar a ser de medio segundo. Otros factores muy importantes son el número de usuarios y las características de tráfico de cada uno de ellos.

Uno de los primeros protocolos es el sistema ALOHA desarrollado por la Universidad de Hawaii. Fue creado para dar acceso a varias terminales repartidas en el archipiélago Hawaiano a la computadora central de la Universidad.

Una clasificación de los protocolos los divide en 5 grupos:

- a) asignación fija
- b) acceso aleatorio (contención)
- c) solicitud de asignación con control centralizado
- d) solicitud de asignación con control distribuido
- e) modos mezclados

El primer grupo asigna una porción fija del canal disponible a cada usuario. Las formas más comunes de división son FDMA y TDMA. FDMA (Frequency Division Multiple Access) divide el espectro en frecuencia disponible entre el número de usuarios dándole a cada uno un ancho de banda determinado. TDMA (Time Division Multiple Access) divide el tiempo en ranuras las cuales son posteriormente subdivididas para asignar una subdivisión a cada usuario del sistema. El orden de las subdivisiones se repite cada ranura.

En los protocolos de acceso aleatorio el canal completo se asigna como uno solo para los usuarios que deseen utilizarlo en un instante dado. Como no se efectúan divisiones, puede suceder que se emitan dos señales simultáneamente anulando ambas transmisiones las cuales deberán ser reprogramadas. La parte fundamental del algoritmo es decidir cómo deben ser resueltas estas colisiones entre transmisiones. Algunos de los protocolos en este grupo son ALOHA y algunas de sus variantes, CSMA (Carrier Sensing Multiple Access) y ETHERNET.

Los protocolos con solicitud de asignación requieren un control que pueda determinar las asignaciones. Si el control es central, existe un "árbitro" externo que selecciona quien es el siguiente usuario que tiene derecho al uso del canal. Polling, SRMA (Split-channel Reservation Multiple Access) y Probing son ejemplos de este grupo.

Si el control es distribuido, cada usuario debe de vigilar las necesidades de los demás y actuar con base en un algoritmo común de prioridades para el uso del canal. Un ejemplo típico de control distribuido son los protocolos de reservación. En éstos, se debe hacer una reservación antes de iniciar la transmisión si se quiere transmitir alguna información. Los protocolos correspondientes a esta división son R-TDMA (Reservation TDMA), R-ALOHA (Reservation ALOHA), BRAM (Broadcast Recognizing Access Method) y MSAP (Mini-Slotted Alternating Priorities).

Por último, los modos mezclados incluyen las técnicas que combinan varios protocolos y el esquema de acceso por sí mismo se va a adaptar a las necesidades cambiantes. Un ejemplo es SRUC (Split Reservation Upon Collision).

El desempeño de un protocolo va a depender en gran manera del tráfico al que sea sometido. Los protocolos de acceso aleatorio suelen ser bastante eficientes con cargas de trabajo bajas, mientras que los de reservación dan mejor rendimiento con cargas medias y altas. Con cargas muy altas, las asignaciones fijas suelen ser las de mejor resultado.

## CAPÍTULO 5

### DISEÑO DE SISTEMAS DE RADIO LOCALIZACIÓN

En este capítulo se presentan tres situaciones reales para las cuales se diseñaron sistemas de radio localización. En el primer ejemplo se utilizará proximity, en el segundo GPS y en el último LORAN.

#### EJEMPLO 1

Se considerará una línea de autobuses foráneos de pasajeros que presta servicio entre México y Querétaro. A lo largo de esta ruta se realizan algunas paradas intermedias.

Uno de los puntos que se desea mejorar es el desempeño por parte de los choferes de los autobuses quienes en muchas ocasiones rebasan los límites de velocidad, poniendo en peligro a los pasajeros. También realizan paradas intermedias, las cuales se prolongan más del tiempo debido, lo que provoca un retraso, que se compensa con mayor velocidad para recuperar el tiempo perdido.

Los problemas anteriores se pueden solucionar si se utiliza un sistema externo que monitoree las unidades en movimiento y así poder tener una mejor estimación del tiempo esperado de llegada, y por lo tanto, posibilidad de programar las salidas siguientes con mayor precisión. Además de esto, la

seguridad aumenta al conocer la posición del autobús a lo largo de la ruta en caso de algún accidente o descompostura.

El sistema actual para controlar la velocidad de los autobuses de pasajeros es una caja negra que registra si el vehículo rebasa la velocidad límite establecida. Este es un sistema poco efectivo ya que en primer lugar se les da cierta tolerancia a los conductores cuando necesitan rebasar algún otro vehículo y requieren una velocidad más alta por cierto tiempo, y en segundo, solamente se registra el número de veces que se excedió el límite de velocidad y por cuánto tiempo, y no en qué momento fueron estos. Un sistema de radio localización puede mejorar estas imprecisiones, ya que al conocerse la posición del móvil se conoce también el tiempo en que se efectúa el reporte. Evaluando entre dos reportes consecutivos, se puede conocer la velocidad promedio y además las características de la carretera recorrida en ese lapso (de subida o bajada, sinuosa, plana...).

Características del problema:

1. rutas fijas
2. distancia 215 km.
3. Terminales en México y Querétaro.

La ruta fija permite la utilización de un sistema proximity indirecto de un solo nivel (figura 5.1): los transmisores hacia la central se colocan junto con los receptores de las señales de la unidad móvil en postes fijos a lo largo de la ruta. El número de postes puede ser bastante menor que el de unidades de la flotilla



y no se necesita un sistema extra para proporcionar la posición (GPS o LORAN). Además se tiene como ventaja el hecho de que la infraestructura no necesita modificarse al incrementar el tamaño de la flotilla, y la tecnología utilizada a bordo es más barata y sencilla.

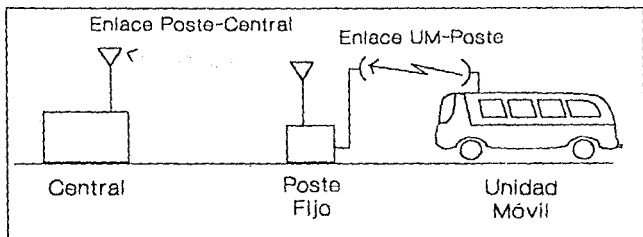


figura 5.1

El autobús envía su señal codificada según su número de identificación el cual es recibido, procesado y retransmitido por el poste. El paquete de transmisión consta de header, trailer, palabras que determinan el inicio y fin del paquete, (8 bits cada uno), y la identificación del autobús 10 bits (1024 como número máximo para la flotilla), que se triplican para poder corregir errores en la transmisión; 46 bits en total.

El número de identificación de la unidad móvil se triplica para dar seguridad. Si llega a existir un error (en un grupo de tres bits) es posible corregirlo pues al ser un número impar, por mayoría se elige uno de cada tres

bits. Si ocurrieran dos errores, la elección será equivocada. Esto se puede mejorar quintuplicando cada bit, pero el mensaje se vuelve más largo.

A una tasa de 1200 bits/seg la duración del paquete de la unidad móvil al poste fijo será de 38.3 milisegundos. Este paquete se deberá retransmitir a lo largo de la ruta de tal manera que en ningún momento quede una sección de la carretera sin recibir el mensaje.

Suponiendo que el autobús se desplaza a 120 km/h, 33.3 m/s, y que la radiación de la señal que envía el mismo tiene un radio de 100m, con repetir la emisión cada  $100/33.3 = 3$  segundos se asegura que todos los postes recibirán las señales. Como en algunos tramos esta carretera divide a los carriles en diferentes sentidos (100 metros aproximadamente). Se utilizará un patrón de repetición cada 2 segundos para tener margen en por si no se recibe la señal. De todas maneras en la ubicación física de los postes se tratará de evitar colocarlos en puntos alejados de la carretera.

Como se utilizarán antenas omnidireccionales para recepción y transmisión, es posible que dos o más paquetes sean enviados simultáneamente y sufran una colisión en la antena receptora. Para evitar esto, se utilizará un protocolo CSMA en los transmisores.

El principio de los protocolos CSMA (Carrier Sense Multiple Access) es no transmitir cuando otro está transmitiendo. Cada unidad debe de tener un receptor que se encarga de detectar otra portadora en el momento en que se quiere transmitir un mensaje. Si el canal está desocupado se realiza la transmisión, si está ocupado, se espera hasta que se desocupe y entonces se envía el mensaje. Este tipo de protocolos no garantizan que no haya colisiones. Si dos unidades móviles generan un paquete en el mismo instante y no detectan

portadoras, enviarán sus paquetes y estos se colisionarán. Todo esto ocurre dentro de un pequeño margen de tiempo llamado periodo vulnerable, el cual está determinado por el tiempo de propagación entre los usuarios. Para nuestro ejemplo, el periodo vulnerable será de  $200 \text{ m} / 300,000 \text{ km/s}$ , aproximadamente  $1 \mu\text{s}$ . Para fines prácticos se considera que no existirán colisiones pues el periodo vulnerable es muy pequeño.

Otra posibilidad de que exista una colisión se presenta cuando dos autobuses circulan en sentido contrario a tal distancia que entre ellos no se detectan pero el poste recibe a ambos. Si transmiten simultáneamente, ocurre una colisión. Dos segundos después se encontrarán lo suficientemente cerca del poste y de ellos mismos como para detectarse y por lo tanto se evita una segunda colisión. Además será necesario que coincidan en el tiempo las transmisiones, es decir  $2 * 38.3 \text{ ms} / 2 \text{ s} = 0.0383$ , 3.8%. La probabilidad de que exista una colisión entre mensajes de dos autobuses es baja.

## DIAGRAMA DE ESTADOS DEL POSTE FIJO

La figura 5.2 muestra el diagrama de estados del poste fijo. Los estados se describen a continuación:

### *ESTADO 1*

El primer estado es la espera de señales en el poste. Si se recibe una señal de una unidad móvil se cambia al estado 2 y si es de la central se pasa al estado 8.

## *ESTADO 2*

El estado de detección recibe la señal de la UM en FSK y a la salida entrega la información (header, UM\*3, trailer)

## *ESTADO 3*

En el estado 3 se verifica que no exista error en la transmisión y que el mensaje recibido esté completo. Si no se cumplen las dos condiciones, se regresa al estado 1. Si se cumplen, se pasa al estado 4.

## *ESTADO 4*

En el estado 4 se eliminan el header y el trailer, se obtiene el número de identificación de la unidad móvil y se compara el número de las últimas 2 unidades que hayan sido detectadas para ver si el autobús no se ha alejado lo suficiente y se ha vuelto a recibir la señal. Si es igual, se regresa al estado 1, si no, se pasa al estado 5.

## *ESTADO 5*

En 5 se determina la hora de recepción de la señal estimando el retraso sufrido en los estados anteriores.

## *ESTADO 6*

En este estado se genera el mensaje que se enviará a la central. Se reciben la hora, el número del poste, status y se agregan header, trailer y CRC (La estructura del mensaje se explicará a continuación).

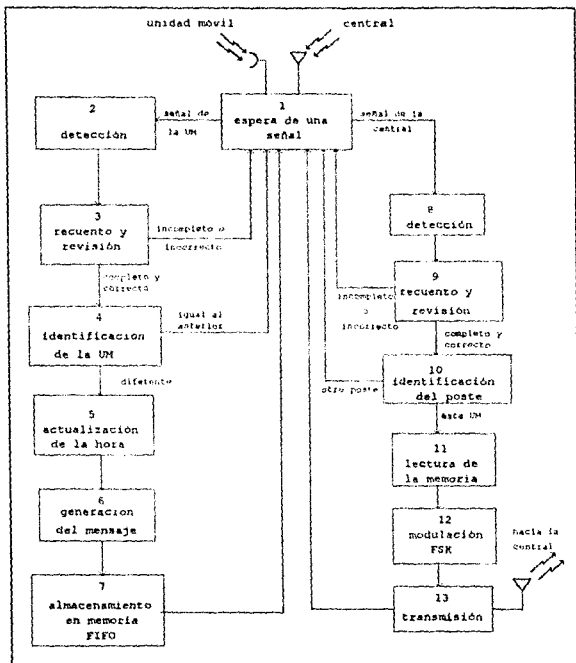


figura 5.2

### ESTADO 7

En el estado 7 se almacena el mensaje en una memoria de características FIFO (First in, first out = primero en entrar, primero en salir). MF representa un

mensaje fijo que se transmite en caso de que no haya pasado una unidad móvil frente al poste. Éste estará en el último lugar de la memoria y podrá repetirse cuantas veces sea necesario.

#### *ESTADO 8*

Se realiza lo mismo que en el estado 2 pero para la señal de la central.

#### *ESTADO 9*

Verificación equivalente a la del estado 3. Si el paquete recibido está completo y sin errores, se pasa al siguiente estado.

#### *ESTADO 10*

Se verifica el número del poste que está siendo "poleado" por la central. Si le corresponde el turno se pasa al estado 11, de lo contrario se regresa al estado 1.

#### *ESTADO 11*

Se saca de la memoria el paquete de la unidad móvil que le corresponda ser transmitido. Si no hay uno se lee el mensaje fijo (MF) y se pasa al estado 12.

#### *ESTADO 12*

Se recibe la información binaria y se modula una portadora en FSK.

#### *ESTADO 13*

Se transmite el mensaje hacia la central y se regresa al estado 1.

Contenido de los mensajes entre postes y la central.

Paquete de los postes a la central 64 bits en total.

1. Identificación del poste emisor (P) consta de 5 bits manejando 32 postes máximo.
2. Hora de cruce en horas, minutos y segundos (Ti); 17 bits (5, 6, 6 bits respectivamente por cada par de cifras p.e. 19:59:59). Si no hubo cruce alguno durante el ciclo de poleo, se indica con una palabra (Ti') 11000 en lugar de los bits de la hora (el número mayor es  $23_D = 10111_B$ ) y 111100 en lugar de los minutos (el número mayor es  $59_D = 111011_B$ ). El resto del mensaje (MF) se reduce al código de protección y el trailer (48 bits en total).
3. Identificación de la unidad móvil (UM) que acaba de pasar, (10 bits (máximo 1024 autobuses).
4. Protección del mensaje (CRC). Se utiliza una revisión de redundancia cíclica, CRC, en particular el polinomio generador  $g(x)$  CCITT-V41 ( $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ ), 16 bits. Este sistema tiene 99.95% de probabilidad de detectar errores hasta de 12 bits de longitud [17]. Los bits que se agregan son el residuo de la división  $D(x)/g(x)$ , donde  $D(x)$  es generado por los datos a proteger. La división se efectúa entre polinomios con coeficientes binarios que siguen la suma módulo-2. Los ceros y los unos se toman como los coeficientes de un polinomio que será desplazado por un factor del grado del polinomio generador. Como ejemplo se usará el mensaje 101011<sub>B</sub> y  $g(x) = x^3 + x^2 + x + 1$ .  $D(x)$  será  $(x^5 + x^3 + x + 1) * x^3$ .

$$\begin{array}{r}
 x^3 + x^2 + x \overline{) x^3 + x^4 + x^3 + 1} \\
 \underline{x^3 + x^4 + x^3} \phantom{+ 1} \\
 x^7 + x^6 \\
 \underline{x^7 + x^6 + x^5} \\
 x^5 + x^4 + x^3 \\
 \underline{x^5 + x^6 + x^5} \\
 x^6 + x^5 + x^4 + x^3 \\
 \underline{x^6 + x^5 + x^4} \\
 x^3 \\
 \underline{x^3 + x^2 + x} \\
 x^2 + x = \text{residuo}
 \end{array}$$

Los coeficientes del polinomio que se obtiene como residuo se agregan como bits de protección, en este caso son 110 y el mensaje completo será 101011110<sub>B</sub>. Para detectar los errores en el receptor, se vuelve a dividir el polinomio, con los bits de protección, entre el polinomio generador, y si el residuo es cero, no hubo error en la transmisión.

$$\begin{array}{r}
 x^3 + x^2 + x \overline{) x^3 + x^4 + x^3} \\
 \underline{x^3 + x^4 + x^3} \\
 x^7 + x^6 + x^5 \\
 \underline{x^7 + x^6 + x^5} \\
 x^2 + x^4 + x^3 + x \\
 \underline{x^7 + x^6 + x^5} \\
 x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x \\
 \underline{x^6 + x^5 + x^4} \\
 x^2 + x \neq 0 \therefore \text{hubo un error}
 \end{array}$$

Si existe un error en el sexto bit y se recibe 101010110<sub>B</sub> al realizar la división se tendrá en residuo diferente a cero, por lo tanto se concluye que hubo un error y esa información no se tomará en cuenta.



Paquete de la central a los postes, 31 bits

1. Datos del poste que debe transmitir, 5 bits. Se triplica la información para evitar la posible equivocación de los postes y se toma una decisión por mayoría, 15 bits en total.

Para ambos paquetes se utiliza una secuencia de 8 bits para indicar el inicio de la transmisión (header, H) y 8 para el final (trailer, T). Ésta es 01010101. Se alternan ceros y unos para poder sincronizar al receptor con la tasa de transmisión. Se utilizará bit-stuffing para evitar que se presente la misma serie dentro del mensaje y se crea que el mensaje ha terminado. En el transmisor se agregará un uno después de cada cadena 010101 en los bits entre header y trailer. Así no se podrá confundir dicha cadena con la de terminación. En el receptor se procederá a eliminar el uno que se encuentre después de una secuencia 010101.

Los bits agregados después de las cadenas aumentan la longitud del mensaje. En siguiente análisis determinará que tanto es este aumento. Considérese  $p$  y  $nc$  el largo y el número de cadenas a las que se agregará un uno,  $nb$  el número de bits no contados en las cadenas  $nc$ , y  $n$  el número de bits a los cuales se les aplicará stuffing.

El total de posibles combinaciones entre ceros y unos en  $n=48$  bits (los bits de header y trailer no se toman en cuenta ya que son fijos) es de:

$$2^{48} = 2.81 * 10^{14} \text{ bits.}$$

El número máximo de cadenas  $nc$  es 8 (48 bits). Para este  $nc$  se tendrá una estructura

$$c_1c_2c_3c_4c_5c_6c_7c_8$$

con sus posibles combinaciones:

$$\binom{nc + nb}{nc} = \frac{(nc + nb)!}{nc!nb!} \quad (5.1)$$

y este número se debe multiplicar por  $2^{nb}$  para tener el total de arreglos. Este valor es una aproximación ya que existirán algunas combinaciones simétricas de las cuales debe eliminarse una, pero son despreciables contra el valor total.

El número de posibles combinaciones con una sola cadena en 48 bits es aproximadamente de:

$$43 * 2^{42} \text{ combinaciones.}$$

Lo que representa un aumento de un bit ( $1/48 = 2.08\%$ ) en el 67% ( $43 * 2^{42}/2^{48}$ ) de los casos. Para dos cadenas el total de combinaciones es aproximadamente:

$$703 * 2^{36}$$

es decir 2 bits (4.16%) en el 17.1% de los casos. Para tres cadenas se tiene:

$$5456 * 2^{30}$$

o tres bits el 2.08% de los casos.

Para cuatro bits es 0.12%, para 5 0.00313% y continúa disminuyendo.

El valor esperado de incremento es el 2.1%, lo que representa un mensaje promedio con 1.01 bits extras. Para los cálculos se tomará en cuenta este incremento solamente en el paquete del poste a la central si hubo un cruce,

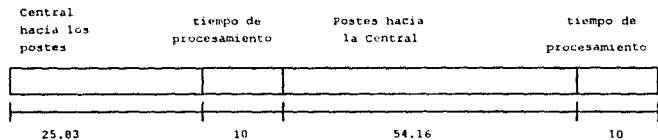
ya que en los otros casos (si no hubo cruce, y central a poste) es menos probable que se agreguen bits por stuffing por la estructura de los paquetes.

Utilizando 1200 bits/seg. como tasa de transmisión, las duraciones de los paquetes de los postes y de la central son 54.16 ms y 25.83 ms respectivamente. El retraso sufrido por la distancia, es de

$$100 \text{ km} / 300,000 \text{ km/s} \approx 0.3 \text{ ms}$$

o menor suponiendo que la antena receptora de la central está a la mitad del camino. Como es pequeño no se toma en cuenta, no así el tiempo de respuesta por procesamiento de los postes y la central.

El periodo completo de transmisión de un poste si hubo un cruce frente a él, tendrá la siguiente estructura:



con un tiempo total de 100 milisegundos.

Suponiendo que se utilizan 21 postes posibles, el muestreo se realizará cada:

$$21 * 100 = 2.1 \text{ segundos}$$

En el caso extremo que ningún poste tenga mensajes que enviar, los paquetes serán más cortos (48 bits, 40 ms), el tiempo será 85.83 ms y el muestreo se realizará en

$$21 * 85.83 = 1.80 \text{ segundos.}$$

Si la separación entre postes de 10 kilómetros aproximadamente y la velocidad promedio de los camiones es de 130 km/h, cada autobús pasará frente a un poste cada

$$10 / 130 \approx 0.0769 \text{ h} \approx 4.61 \text{ minutos.}$$

Se aproxima y no se iguala ya que los postes no estarán todos a la misma distancia. Estos valores son un promedio.

Para poder calcular el número máximo de unidades que podrán encontrarse entre poste y poste se considerará que cada poste tiene un mensaje por transmitir y que la distancia entre las unidades que estén en circulación será la misma, aunque en realidad se sabe que no se encuentran distribuidas uniformemente. El número es:

$$4.61 * 60 / 2.1 = 131.7 \text{ unidades}$$

y por los 21 postes a lo largo de toda la ruta son

$$131.7 * 21 = 2766 \text{ autobuses que se pueden monitorear.}$$

El número de unidades móviles que puede manejar el sistema es más del doble del número de autobuses de la flotilla, esto permite la posibilidad de prestar el servicio a otras compañías, ya sean de carga o de pasajeros.

## ENLACE DE RADIO POSTES-CENTRAL

Los enlaces de radio entre los postes y la central se realizarán entre cada uno de los postes y una central de recepción de datos que se encontrará a la mitad del camino entre México y Querétaro, aproximadamente en Calpulalpan, Estado de México.

Se supondrá una frecuencia de 300 MHz, las antenas de los postes fijos a 5 metros del piso, la antena de la central a 50 metros. Los cálculos de los enlaces se realizarán con los nomogramas de Bullington [18] 8 (figura 3.4), 1 y 7 (figura 5.3).

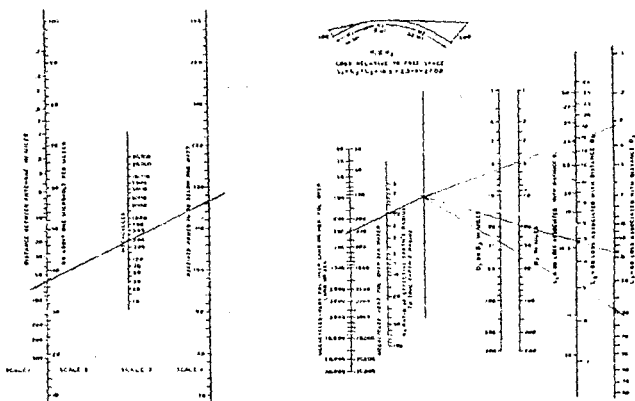


figura 5.3

Si el enlace cuenta con línea de vista, la potencia recibida en dB por debajo de un watt se lee en la escala de la derecha del nomograma 1, trazando una línea sobre la distancia entre antenas (escala izquierda) y la frecuencia de transmisión (escala central).

Si el enlace no tiene línea de vista se utiliza el nomograma 7. Se calcula la distancia al horizonte (fórmula 3.7) de cada antena ( $d_1$  y  $d_2$ ) y la distancia intermedia ( $d_3$ ). Se obtienen las pérdidas por cada distancia y se suma a la obtenida en el nomograma 1 por la distancia total.

De los nomogramas se obtuvo la gráfica de la figura 5.4.

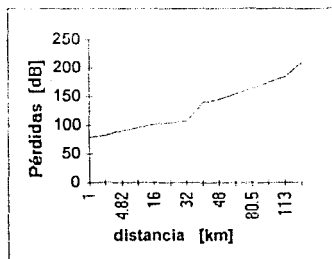


figura 5.4

Para un poste que se encuentre a 96 km de la central, las pérdidas serán de 175 dB (ver nomogramas), si la potencia de transmisión es de 100 W, 20 dBW y la antena del poste tiene 5 dB de ganancia, la potencia recibida será de  $20 + 5 - 175 = -150$  dBW. Para un poste a 40 km de la central con la misma potencia de

transmisión se tendrá  $20 + 5 - 139.5 = -114.5$  dBW. Un poste más cercano, a 8 km de la central, inducirá una potencia de  $20 + 5 - 96 = -71$  dBW. Estos valores tienen una imprecisión de  $\pm 6$  a 10 dB por el efecto de árboles, edificios o irregularidades del terreno que se consideró totalmente plano.

Con estos valores se puede determinar el equipo a utilizar y la potencia de los postes dependiendo de su distancia a la central.

La comunicación entre la central y las terminales de los autobuses en México y Querétaro se puede realizar vía telefónica.

Uno de los métodos más comunes de modulación es FSK por su sencillez y su relativa seguridad. La información digital se transmite utilizando diferentes frecuencias. En la figura 5.5 se observa una secuencia 010101 con amplitud  $A=1$ , donde a cero le corresponde  $\omega_1$ , a uno  $\omega_2$  y  $\omega_1 < \omega_2$ .

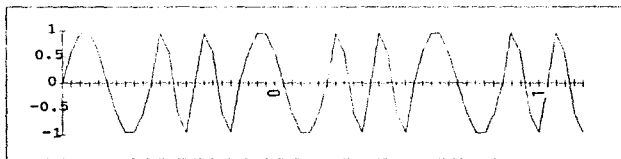


figura 5.5

La ecuación que describe la señal es [16] :

$$\begin{aligned}
 f_c(t) &= A \cos \omega_1 t & 0 \leq t \leq T \\
 \text{ó} \quad f_c(t) &= A \cos \omega_2 t & 0 \leq t \leq T
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

T es la duración del pulso y se toma como valor 1/1200 seg., lo que implica un ancho de banda de 1200 Hz en banda base. Si se definen las frecuencias en términos de la separación entre ellas  $f_1 = f_c + \Delta f$ , y  $f_2 = f_c - \Delta f$ , la ecuación se puede reescribir:

$$f_c(t) = A \cos (\omega_c \pm \Delta\omega)t \quad 0 \leq t \leq T \tag{5.3}$$

A  $\Delta f$  se le conoce como la desviación de frecuencia. De esta desviación y del ancho de banda en banda base (BB) va a depender el ancho de banda de la señal en FSK:

$$AB_{FSK} = 2\Delta f + 2BB \tag{5.4}$$

Para el ejemplo  $\Delta f$  se define como  $(f_1 - f_2)/2$ ,  $f_1 = m/T$ ,  $f_2 = n/T$ , m y n son enteros, 1 y 2.  $\Delta f = 600$  y el ancho de banda será:

$$AB_{FSK} = 2(600) + 2(1200) = 3600 \text{ Hz}$$

El ancho de banda es relativamente pequeño lo cual ayudará al solicitar una banda de frecuencia a la SCT



## FUNCIONES DE LA CENTRAL

La central estará a cargo del manejo de la información aportada por las unidades móviles que se encuentren en movimiento. El diagrama de estados correspondiente es el siguiente:

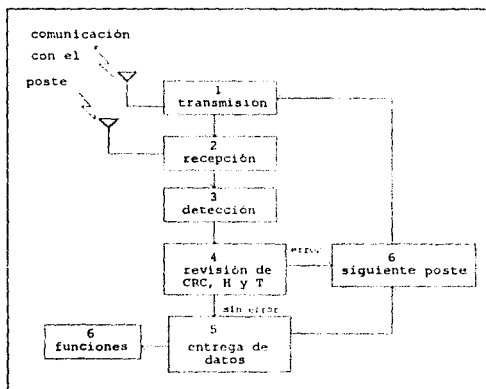


figura 5.6

Los estados 1, 2, 3, 4 y 6 forman el ciclo de poleo. En el estado 1 se transmite un paquete que solicita la respuesta de un poste que se espera en el estado 2. El estado 3 demodula la señal recibida y en el estado 4 se revisa la información obtenida. En caso de que exista un error o no se reciba el paquete completo, se pasa al estado 6 que genera el mensaje correspondiente para el siguiente poste.

Si no hubo error y el mensaje recibido fue completo se entregan los datos y se procede a compararlos contra una base de datos.

La estructura de la base de datos es la siguiente:

poste	distancia	$t_{\text{mínimo}}$	$t_{\text{rápido}}$	$t_{\text{lento}}$	$t_{\text{máximo}}$
0	0	0	0	0	0
1	3.3 km	1.53	1.98	3.96	9.9
2	3.6 km	1.66	2.16	4.32	10.8
3	3 km	1.38	1.80	3.60	9
...	...	...	...	...	...

Tabla 5.1

Se conoce la ubicación precisa de cada poste y la distancia entre ese y el anterior. También se conocen las características del camino y la velocidad promedio para cada intervalo. Los tiempos rápido y lento (50 y 100 km/h en este ejemplo) se utilizan para monitorear al autobús a lo largo del recorrido dentro de límites permisibles. Si se rebasan los tiempos mínimo o máximo se da una alarma pues está fuera de lo permisible lo que puede indicar u ocasionar un accidente o descompostura (20 y 130 km/h).

Si entre dos postes se encuentra alguna parada regular de la ruta como merenderos, estaciones, casetas, se deben compensar los tiempos de la base de datos.

La información recibida se almacenará de la siguiente manera para cada unidad móvil con el nombre del conductor respectivo:

	tiempo	situación
1	t1	B
2	t2	D
...	...	...

Tabla 5.2

La situación se refiere a la comparación con los tiempos de la base de datos:  $A < t_{\text{mínimo}}, t_{\text{mínimo}} < B < t_{\text{rápido}}, t_{\text{rápido}} < C < t_{\text{lento}}, t_{\text{lento}} < D < t_{\text{máximo}}, t_{\text{máximo}} < E$ . En los archivos de cada unidad móvil se deben cuidar dos aspectos: uno, que no se reciba la identificación de algún poste puede significar que éste se haya averiado y no esté transmitiendo correctamente y dos, que no se reciba correctamente la señal de la UM, porque puede ser que su transmisor esté funcionando mal.

El primer (o último) poste se coloca a la entrada (o salida) de las estaciones para que en la central se finalice o inicie el procesamiento de la información de esa UM.

Al final del recorrido se calculará la velocidad promedio, el tiempo total y se mostrará el recuento de las situaciones presentadas a lo largo de la ruta.

Todo este proceso puede de ir acompañado de un despliegue gráfico de las UM. Se puede mostrar de alguna forma especial (en otro color o dentro de un círculo) aquellas que se encuentren en situaciones de alarma (A o E).

#### Conclusiones:

El sistema diseñado permite el monitoreo de un número elevado de unidades móviles, tal vez mayor al número de autobuses de la línea por lo que

se podría prestar el mismo servicio a otras compañías o a alguna otra empresa que requiriera de servicios similares. Legalmente funcionará como un servicio privado mientras sea para la compañía solamente, de lo contrario será un servicio público.

Los enlaces entre poste y autobús no deben ser problemáticos ya que la distancia recorrida por la señal es muy pequeña por lo que los fenómenos de propagación se simplifican. Para este enlace y el de los postes a la central, se debe conseguir una licencia de la SCT. Como el ancho de banda de la señal es pequeño es probable encontrar una porción de espectro libre.

La central requerirá de un equipo de cómputo para el procesamiento y despliegue de la información. La información particular respectiva a cada conductor será disponible y se podrá revisar su desempeño para con la compañía.

Las unidades móviles que sufran averías o algún accidente durante la ruta, serán fácilmente detectables si de un momento a otro se deja de recibir su señal. Para solucionar estos problemas se pueden utilizar equipos de auxilio.

Los postes fijos que dejen de emitir su señal serán fácilmente detectados. Esto se puede deber a algún accidente o bien a que se haya terminado la batería con la que trabajaban. En ambos casos es necesario mandar un equipo a reactivar el poste. Aún así no es grave el hecho de que no funcione uno, pues se le ignora y se procesa la información con la distancia y tiempo entre los postes anterior y posterior.

## EJEMPLO 2

### SISTEMA DE SEGURIDAD PARA CAMIONES QUE TRANSPORTAN COMBUSTIBLES O PERECEDEROS

Se diseñará un sistema de alarma para instalarse en pipas para enviar información a una central en caso de que la unidad móvil sufra algún percance: avería mecánica, choque, fuga, ... La central se encargará de mandar el equipo de auxilio correspondiente al lugar donde se encuentre el vehículo.

La señal de alarma puede ser de dos tipos: automática o manual. Las opciones se utilizarán dependiendo de la gravedad del caso pues puede suceder que el conductor pierda el sentido en un accidente y no pueda accionar la alarma. También puede ser que el motor tenga alguna falla y no se registre por el sistema de activación automática.

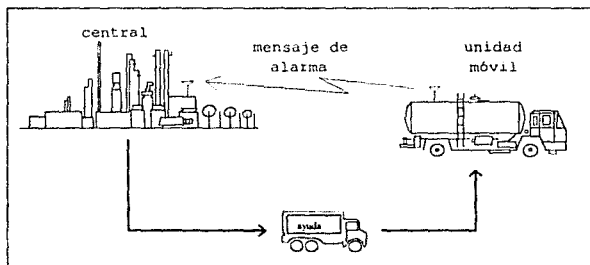


figura 5.7

El funcionamiento del sistema está representado en la figura 5.7. La unidad móvil en problemas envía un señal a la central y esta manda a un equipo de ayuda para solucionar el problema.

El funcionamiento general del sistema de alarma de la unidad móvil se presenta en forma de diagrama de estados de la siguiente manera:

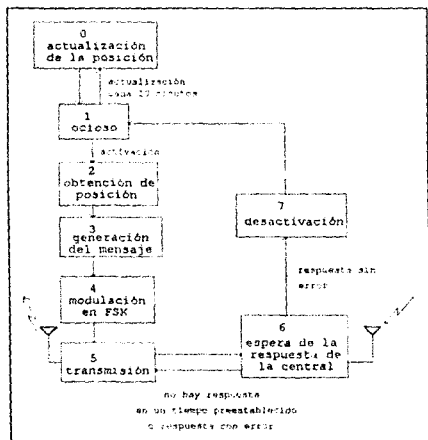


figura 5.8

### ESTADO 1

Es un estado de espera que necesita la activación del sistema de alarma, ya sea automática o manual para cambiar al estado 2. Mientras no se active la

alarma está en actualización cada 10 minutos para guardar una posición reciente por si se deshabilita el sistema de localización en el momento de la activación automática.

#### *ESTADOS 0 y 2*

El radio localizador obtiene las coordenadas de posición del vehículo y las manda al estado siguiente.

#### *ESTADO 3*

Se genera el paquete que se enviará a la central con header, trailer, CRC, número de identificación de la unidad móvil y la posición. El paquete se manda al estado siguiente.

#### *ESTADO 4*

Los datos del paquete modulan a una portadora de UHF en FSK y la manda al estado 5.

#### *ESTADO 5*

El mensaje se transmite por radio a la central y se espera la respuesta de ésta para saber si el mensaje fue recibido exitosamente. Si en la central se detecta algún error o no se recibe completo el paquete, no se responde y se espera la retransmisión de la unidad móvil.

#### *ESTADO 6*

Una vez efectuada la transmisión se pasa a un estado de espera. La condición para salir de este estado es obtener un respuesta de la central. Si no se obtiene se supone que la central no ha recibido el mensaje y se regresa al

estado de transmisión después de un pequeño retardo (entre 20 y 30 segundos). Si existe colisión entre paquetes la central no responde y espera que se vuelva a transmitir. Si se recibe el mensaje de la central incompleto o con error, se regresa al estado 5. Una vez que se recibe un mensaje de la central sin error y completo, se pasa a un estado de desactivación y de ahí al estado inicial o de ocioso.

El enlace entre las unidades móviles y la central se realiza por radio UHF. Neham [22] utilizó los modelos de Okumura [14] para determinar un área de cobertura aproximada para sistemas de radio terrestre móvil. Los experimentos en [22] utilizaron 100 W de transmisión a 150 MHz, 6 dB de ganancia en la antena transmisora y alturas de 150 y 6 pies para las antenas fija y móvil. Tomando en cuenta los resultados de Young [12] en la figura 4.6, si se utiliza una frecuencia entre 400 y 500 MHz, la potencia necesaria será menor. Los resultados obtenidos para una zona suburbana, tomando en cuenta que el 90% de las transmisiones fueron recibidas correctamente es de 6.4 km. Para el 50% es de 100 km. Estas distancias son menores a las que abarcan las rutas y zonas en general. Para solucionar esto se dividirá el área total de cobertura en células en forma similar a la que utilizan los sistemas de telefonía celular para sectorizar ciudades.

Las células tendrán radios menores a 60 kilómetros, dependiendo del área total que se quiera cubrir. Cada célula tendrá una central y estarán comunicadas entre sí, de tal manera que si una unidad solicita ayuda en un punto intermedio y dos células registran la llamada, se llegará a una decisión entre ellas y sólo una tomará acción en el evento.



La longitud y estructura del paquete se determina en forma similar al ejemplo anterior:

#### Paquete Unidad Móvil-Central

- 1 Identificación del usuario 15 bits (32,767 como máximo, uno de los números se reserva para la central).
- 2 Coordenadas de la posición 8 bytes (4 para latitud, 4 para longitud) 64 bits.
- 3 Se utiliza el mismo CRC que en el ejemplo anterior, 16 bits.
- 4 Header y trailer iguales que en el ejemplo 1, 16 bits.

El total es de 111 bits, por la utilización del bit stuffing, se suponen 2.77 bits extras en promedio de los paquetes lo que implica un tiempo de 94.8 ms con la misma tasa de transmisión que el ejemplo anterior.

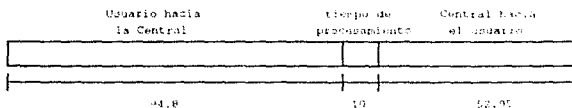
#### Paquete Central-Unidad Móvil

- 1 Header y trailer 16 bits.
- 2 Identificación de la central 15 bits para mostrar que quien está transmitiendo es la central.
- 3 Número del usuario 15 bits para identificar al usuario que solicita ayuda.
- 4 CRC 16 bits.

Son 62 bits en total más 1.55 bits del stuffing, 52.95 ms. Se utiliza el mismo CRC, header y trailer que en el paquete de la UM a la central.

El retraso por la distancia se puede despreciar ya que los tiempos son bastante pequeños:

$$t = 60 \text{ km} / 300,000 \text{ km/s} = 0.2 \text{ ms}$$



Se considera un tiempo de respuesta por procesamiento en la central de 10 ms y se forma un solo paquete al mensaje de alarma y la respuesta de la central de  $T = 157.75$  ms de duración.

La probabilidad de utilización del sistema de alarma es baja y el número de usuarios es alto por lo tanto se puede pensar en utilizar un protocolo como el Aloha puro.

El Aloha pertenece al grupo de los protocolos de contención en los cuales existe la posibilidad de que dos o más llamadas sean emitidas simultáneamente y por tanto ninguna de ellas pueda ser recibida; esto se conoce como colisión. En caso de que ocurra una colisión cada paquete será retransmitido después de cierto tiempo con la esperanza de que no suceda otra colisión.

El protocolo considera una población infinita de usuarios que transmite paquetes de duración  $T$  [segundos].

El proceso de incidencia de llamadas a la central desde una unidad móvil se considera como aleatorio distribuido en el tiempo y con distribución de Poisson ya que el modelo del proceso en la central se ajusta a las hipótesis de la distribución:

1. La probabilidad de que ocurra una llamada en un pequeño intervalo de tiempo  $t$  es igual a  $\lambda t$ , donde  $\lambda$  es una constante que representa las llamadas generadas en un instante.
2. La probabilidad de que en un intervalo sucedan dos o más llamadas es insignificante frente a la probabilidad de que ocurra una.
3. La probabilidad de que en un intervalo se registre una llamada no cambia por el número de llamadas registradas en los intervalos anteriores.

De la primera consideración se desprende una más si a su vez se toma como un evento de Bernoulli al hecho de que ocurran o no llamadas en un intervalo:

4. La probabilidad de que no ocurran llamadas en un intervalo es  $1-\lambda t$ .

En el proceso de llamadas a la central se presentan las llamadas que acaban de ser generadas a razón de  $\lambda$ , y las que sufrieron colisión y son retransmitidas, el proceso de Poisson debe ser modelado con un valor  $g > \lambda$ .

Sea  $f(x)$  la probabilidad de que ocurran  $x$  llamadas en un intervalo, la distribución de  $f(x)$  está dada por:

$$f(x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t} \quad x=0,1,2, \dots \quad (5.5)$$

La probabilidad de que un paquete sea recibido exitosamente en la central dependerá de que ningún otro paquete sea transmitido durante su proceso de transmisión. Eso implica  $T$  tiempo antes y  $T$  tiempo después o  $2T$  en la fórmula de la distribución de Poisson:

$$f(0) = \frac{(2gT)^0}{0!} e^{-2gT} = e^{-2gT} \quad (5.6)$$

El número de paquetes transmitidos exitosamente será  $g \cdot f(0)$  con una duración de T segundos cada uno. El rendimiento se define como la fracción de tiempo que transmite información de forma exitosa:

$$S = gT e^{-2gT} \quad (5.7)$$

A  $gT$  se le define como G o carga normalizada del sistema. El máximo valor de S estará dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dG} &= e^{-2G} - 2G e^{-2G} = 0 \\ e^{-2G} &= 2G e^{-2G} \\ G &= 0.5; \quad S = \frac{1}{2e} \approx 0.18 \end{aligned}$$

El comportamiento del rendimiento contra la carga normalizada se muestra en la siguiente figura.

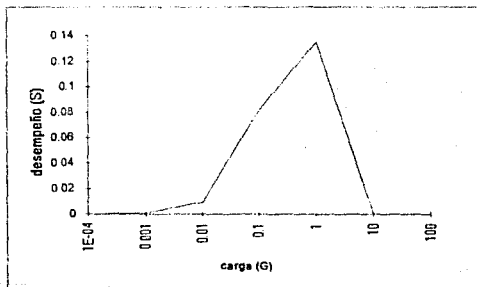


figura 5.9

Si el valor de rendimiento es cercano a cero el sistema será estable. Si el sistema aumenta la carga más allá del máximo valor del rendimiento, 0.1839, el rendimiento irá decreciendo mientras aumente la carga lo que implica un sistema inestable, y la probabilidad de que un usuario transmita exitosamente será cero.

Para el sistema de alarma, suponiendo que no existen errores en la transmisión, la ocurrencia de llamadas por segundo se determina por la utilización máxima, una por día por usuario,  $p = 1/24/3600 = 1.15 \text{ e-}5$  [llamadas por segundo por usuario] y  $\lambda = 32768 * 1.15 \text{ e-}5 = 0.379$  [llamadas por segundo]. Si no hay llamadas pendientes ( $g = \lambda$ ), la carga normalizada del canal es  $0.379 * 0.15775 = 0.0597$  [llamadas]. La probabilidad de que sea recibido exitosamente en la central será:  $P(\text{éxito}) = e^{-2gT}$  y para este caso es de 88.7%.

Para el rendimiento se tiene:

$$S = gT e^{-2gT} = 0.053.$$

Si se comparan estos valores con la gráfica de desempeño del protocolo Aloha se observa que se encuentra en la zona de estabilidad ya que si aumenta  $G$  también aumenta el rendimiento, por tanto los paquetes serán recibidos más rápido que antes y se regresará al punto de estabilidad. Además, los cálculos se hicieron para el caso de utilización máxima, en realidad la utilización es menor a una vez cada día.

El área de cobertura es bastante grande y podría pensarse en llegar a tener una cobertura en todas las zonas en las que se encuentren estas unidades móviles. Se puede pensar en ir instalando las células poco a poco, por lo que no

conviene utilizar un sistema LORAN para efectuar la radio localización de la unidad móvil. La mejor opción es GPS por su cobertura global.

## FUNCIONES DE LA CENTRAL

El diagrama de estados de la central es el siguiente:

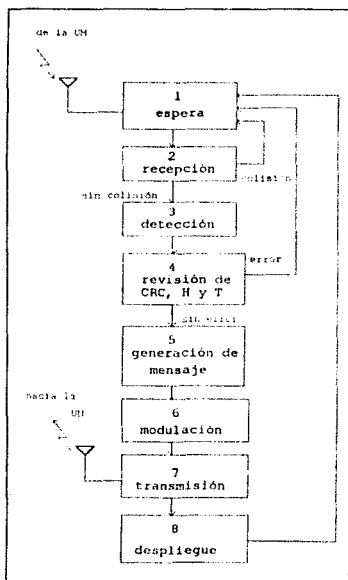


figura 5.10

### *ESTADO 1*

El estado 1 es de espera a que llegue una señal de algún usuario en problemas. Cuando se recibe alguna señal, se pasa al estado 2.

### *ESTADO 2*

Este estado se encarga de detectar si sucedió o no una colisión entre dos o más señales. Si es así, se regresa al estado uno.

### *ESTADO 3*

Si no hubo colisión entre paquetes se demodula la señal recibida para ser analizada la información en el estado 4.

### *ESTADO 4*

Se revisa que no exista error en el paquete y que este haya sido recibido completo. Si no existe error, se procede al estado 5, si no se regresa al estado 1.

### *ESTADO 5*

Se genera el paquete de regreso hacia la central para hacer saber al usuario que su mensaje de alarma fue recibido.

### *ESTADO 6*

Se modula una portadora en FSK para ser transmitida en el estado 7.

### *ESTADO 7*

Se transmite el paquete hacia el usuario que mandó la señal de alarma.

## *ESTADO 8*

Se despliega la información del usuario y se regresa al estado 1.

Antes de tomar alguna acción, la central se debe de comunicar con las demás centrales por si la señal de alarma fue recibida por varias de ellas. Esta comunicación puede ser vía telefónica.

La unidad de despliegue debe hacerse sobre un mapa de la región para que pueda identificarse el lugar del accidente y la ruta que se deberá tomar para llegar hasta ahí.

## CONCLUSIONES

El sistema diseñado podría utilizarse en otro tipo de vehículos como los que transportan cargas peligrosas o valiosas. La compañía que hiciera la instalación podría prestar el mismo servicio a otra compañía que requiriera de servicios similares en el área cubierta. Legalmente se tratará como un servicio privado mientras sea para la compañía solamente, si no, será un servicio público.

Si el número de unidades móviles crece, la probabilidad de colisiones entre llamadas aumenta. Si el sistema se acerca a la inestabilidad, o simplemente se desea mejorarlo, es posible utilizar otro tipo de protocolos, también de contención, que den mejores resultados como el ALOHA ranurado o el CSMA.



### EJEMPLO 3

#### SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA FLOTILLA DE VEHÍCULOS DE DISTRIBUCIÓN EN UN ÁREA URBANA.

En la Ciudad de México así como en otras zonas urbanas existen compañías privadas y dependencias públicas que utilizan flotillas de vehículos para distribución de productos. Algunos ejemplos son reparto de gas butano, oxígeno para enfermos, bebidas embotelladas y productos alimenticios tanto a gran escala (Conasupo) como a pequeña escala (tiendas de abarrotes). Las flotillas recorren diferentes rutas durante el día, y a veces en la noche, por lo que es importante poder tener control sobre el desplazamiento de las unidades.

Los conductores de las unidades móviles pueden utilizar los vehículos para fines que no les correspondan. Algunos problemas frecuentes son las paradas no programadas en la ruta o desviaciones de la trayectoria original. Si se lleva un control de las rutas cubiertas se pueden conocer este tipo de problemas en la central y también se tendrá conocimiento de los solicitantes del servicio atendidos.

Características del problema:

1. Varias rutas no siempre fijas.
2. Zona urbana (aproximadamente 30 km de radio)

La primera característica va a excluir la utilización de localización por proximidad ya que las rutas además de ser varias pueden variar ligeramente por situaciones imprevistas (calles bloqueadas, negocios cerrados, ...). Para poder

cubrir la zona con postes fijos sería necesaria una cantidad extremadamente grande de ellos.

También debe tomarse en cuenta que la recepción de las señales de los satélites de GPS puede verse obstruida en una ciudad, como en estacionamientos cubiertos o bajo puentes e inclusive por los mismos edificios en algunos casos. Mediciones experimentales realizadas para esta tesis con un equipo de recepción MAGELLAN OEM/PS (P/N 00-88500-000) y una antena (P/N 00--81001-000) en México D.F. mostraron que en algunos casos se pierde la señal de un satélite y se producen errores de uno a dos minutos terrestres, lo que representa entre 2 y 4 kilómetros de desviación de la posición correcta.

La señal de localización de LORAN se propaga por onda de superficie por lo que puede ser recibida en estacionamientos y bajo puentes, además no se ve afectada por los fenómenos climatológicos por lo que resulta muy confiable. Para este ejemplo el mejor sistema de radio localización es LORAN.

La comunicación a la central se puede realizar en VHF y se aprovecha que la antena de LORAN de los equipos comerciales de Ross Engineering Company se puede utilizar también para VHF. Ésta mide 36 pulgadas por lo que no es difícil de instalar en la unidad móvil.

Los paquetes que contienen los mensajes entre las unidades móviles y la central se determinan en forma similar a los otros ejemplos:

- 1 Header 8 bits.
- 2 Número de identificación de la unidad móvil 12 bits (4096 unidades como máximo en la flotilla)

- 3 Coordenadas que determinen la posición, 4 bytes para latitud y 4 para longitud, 64 bits.
- 4 Protección para determinar errores, CRC, 16 bits.
- 5 Trailer 8 bits.

El header, trailer y CRC son los mismos que en el primer ejemplo. El total de bits en el mensaje es 108, más 2.7 bits en promedio por el stuffing que se aplica al igual que en el ejemplo 1, 110.7. Utilizando la tasa de transmisión de 1200 bps la duración del paquete será de 92.25 ms

En primer lugar se analizará un protocolo de reservación, libre de conflictos, llamado MSAP (Mini-Slotted Alternating Priorities) que se describe a continuación.

La base del protocolo [13] es la división del eje del tiempo en ranuras. Para evitar las colisiones entre mensajes es necesario llegar a un acuerdo entre los usuarios para decidir quién utilizará una ranura un determinado momento. Este acuerdo se logra con un algoritmo arbitrario que decide entre los usuarios que previamente hayan solicitado el uso del canal. Este esquema requiere de un orden de jerarquías entre los usuarios que puede ser de tres tipos:

1. Prioridades fijas: el orden de transmisión siempre empieza por uno de los usuarios y se prosigue en el orden preestablecido; 0,1,2,3,...
2. Round-robin: la transmisión se efectúa por el usuario siguiente al que efectuó la transmisión;  $i+1$ ,  $i+2$
3. Prioridades alternadas: el último usuario que transmitió es el que comienza la jerarquía  $i$ ,  $i+1$ ,  $i+2$

Una vez que se establece el orden de los usuarios y se determina el orden de jerarquías se puede utilizar el esquema de acuerdo a la siguiente figura.

En primer lugar se divide el tiempo en ranuras que a su vez se subdividen en dos secciones: una para la reservación y otra para la transmisión. Las mini ranuras de reservación tienen una duración  $t$ , equivalente al tiempo de propagación máximo del sistema, es decir, entre los puntos más lejanos. Estas ranuras se van a repetir tantas veces como usuarios existan. El tiempo  $T$  se dedica a la transmisión hacia la central.

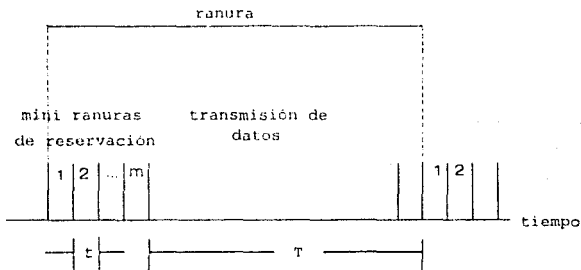


figura 5.11

Los usuarios que deseen transmitir en un momento dado, emiten una señal en la mini ranura de reservación que les corresponda. El usuario que tenga la prioridad más alta comienza a transmitir una portadora sin modular durante las  $M-1$  mini ranuras, y después su mensaje. Un usuario con prioridad intermedia

debe esperar a que los usuarios con jerarquías mayores a la suya hayan realizado sus transmisiones, es decir, que las mini ranuras anteriores hayan estado libres. La mini ranura al final del tiempo de transmisión se utiliza para avisar a los usuarios que ha terminado la transmisión, se sincronizan los usuarios y comienza una nueva ranura.

Para determinar el rendimiento del protocolo se divide el tiempo efectivo de transmisión entre el tiempo total de la ranura:

$$S = \frac{T}{T + Mt} = \frac{1}{1 + Mt} \quad (5.8)$$

Donde M es el número de usuarios

t es el tiempo de la mini ranura

T es el tiempo de transmisión

a se define como  $t/T$ .

El tiempo entre dos mensajes de un mismo usuario suponiendo que todos desean transmitir y que se usan jerarquías del tipo round-robin es:

$$T_n = M(Mt + T) = M^2t + MT \quad (5.9)$$

Para nuestro caso, el valor de t está dado por:

$$t = \frac{60km}{300000 \frac{km}{s}} = 0.2 \text{ ms}$$

Utilizando este valor,  $T = 92.25$  ms y un tiempo de procesamiento de 10 ms como parte de  $T$ , en las ecuaciones anteriores, se obtuvo la siguiente gráfica.

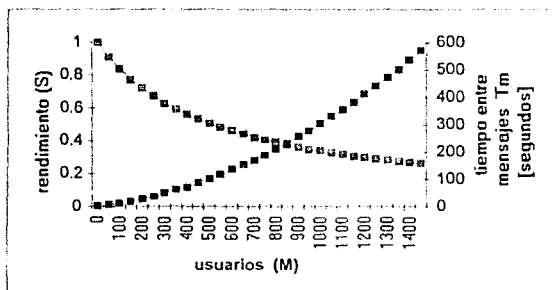


figura 5.12

El rendimiento decrece conforme aumenta el número de usuarios, mientras que el tiempo entre mensajes aumenta con los usuarios.

Si la flotilla cuenta con 300 unidades, cada unidad podrá repetir su transmisión cada 48.67 segundos. El rendimiento será 0.63

A continuación se analizará otro protocolo para el mismo caso y poder comparar los resultados.

En un protocolo de "polling" se tiene que considerar el paquete de la central hacia los usuarios:

- 1 Header 8 bits.

- 2 El número de identificación de la unidad móvil que debe transmitir, triplicado para evitar errores  $12 \cdot 3 = 36$  bits.
- 3 Trailer 8 bits.

En total son 52 bits, para este paquete el bit-stuffing no es tan significativo ya que al triplicarse los bits es más difícil que se presente una sucesión como la de header o trailer. Con la misma tasa, la duración es de 43.33 ms y la ranura en el tiempo es de 155.58 ms.

Si se quiere conocer el tiempo entre mensajes en función del número de usuarios se tiene una función de primer orden:

$$T_m = 0.15558 \cdot M \quad (5.10)$$

En la siguiente gráfica se pueden comparar los valores de  $T_m$  para los dos protocolos.

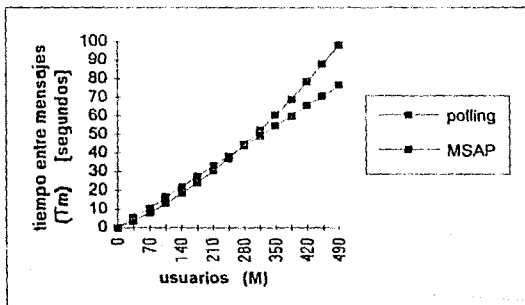


figura 5.13

Para valores menores a 266 usuarios el tiempo entre mensajes de MSAP es menor que en polling, pero a partir de ahí, el tiempo de MSAP empieza a crecer en forma cuadrática y las diferencias con polling son considerables. Para una flotilla de 300 unidades móviles, el tiempo entre mensajes para polling es de 46.67 segundos mientras que para MSAP es de 48.67.

Si se considerara la utilización de un protocolo de contención como el ALOHA analizado en el ejemplo anterior, se vería que para este tipo de aplicaciones no resulta práctico. El análisis se realizará para 266 vehículos y 41.38 segundos de tiempo entre mensajes por usuario, valor en el que coinciden MSAP y polling.

La probabilidad de utilización será

$$1/41.38 = 0.0241 \text{ [llamadas por segundo por usuario]}$$

y por tanto

$$\lambda = 0.0241 * 266 = 6.427 \text{ [llamadas por segundo]}$$

la carga normalizada si no existen llamadas pendientes

$$G = 0.5929,$$

y la probabilidad de éxito será del 30.5%. El rendimiento es:

$$S = 0.5929 * 0.3054 = 0.1811.$$

Se encuentra muy cerca del límite de la estabilidad por lo que un pequeño incremento de  $\lambda$  resultaría en un sistema inestable. Estos resultados nos indican que no conviene utilizar un protocolo de contención, de cada 10 llamadas



generadas solamente tres, en promedio, podrán ser recibidas sin colisiones en la central y la estabilidad del sistema está en punto crítico.

Antes de decidir entre MSAP y polling por el tiempo entre mensajes o número de vehículos que pueden ser monitoreados en un tiempo determinado debe de tomarse en cuenta que en MSAP solamente los usuarios que soliciten un espacio para transmitir participan en el ciclo. Si uno no necesita transmitir no es tomado en cuenta. Se puede establecer que la unidad móvil solicite una ranura solamente si se encuentra el motor encendido, para evitar transmitir varias veces la misma posición mientras la unidad se encuentra estacionada.

Se suponen diez minutos en promedio para una parada y veinte minutos de tiempo entre paradas. La unidad solicitará una ranura de transmisión el 66.66% de las veces por lo que el tiempo entre mensajes se reduce a 32.44 segundos, además se evita estar repitiendo la información cuando el vehículo está parado. Para las condiciones del problema es mejor utilizar un protocolo MSAP.

El diagrama de estados de la unidad móvil es el siguiente:

#### *ESTADO 1*

Es un estado de espera que necesita la señal de sincronía de la central para cambiar al estado 2

#### *ESTADO 2*

Se revisan las miniranuras anteriores, según la jerarquía preestablecida para saber si el turno le corresponde para transmitir. Si no le corresponde regresa al estado 1.

### ESTADO 3

Se revisa si el motor de la unidad móvil está encendido. Si está apagado, se regresa al estado 1, si no se pasa al estado 4.

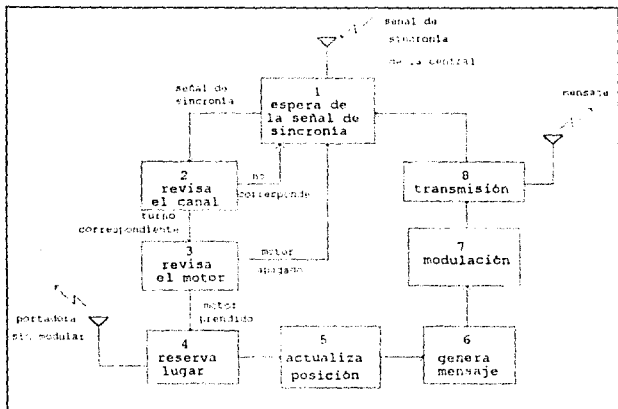


figura 5.14

### ESTADO 4

Se reserva el lugar transmitiendo una portadora sin modular.

### ESTADO 5

El radio localizador obtiene las coordenadas de posición del vehículo en el ese momento.

#### *ESTADO 6*

Se genera el paquete con header, trailer, CRC, número de identificación de la unidad móvil y la posición.

#### *ESTADO 7*

El mensaje modula a una portadora de UHF en FSK y la manda al estado 8.

#### *ESTADO 8*

El mensaje se transmite por radio a la central y se pasa al estado 1.

#### Diseño de LORAN

Para determinar la cobertura de LORAN se utilizó el programa mencionado en el capítulo 4 y descrito en el apéndice A. El área que se desea cubrir con esta configuración es el Distrito Federal. Sin embargo, como la cobertura que se puede obtener es bastante mayor se buscará incluir en las zonas de menor error a las ciudades cercanas, en primera instancia Toluca y Cuernavaca y en segunda Querétaro y Puebla. Las ciudades de Puebla, Pachuca, Querétaro, Toluca y Cuernavaca, las carreteras que las conectan con el Distrito Federal, así como el contorno del área metropolitana se grafican para poder ubicar fácilmente las zonas de cobertura.

Para determinar la posición de las antenas se debe de tener idea del resultado que puede dar la disposición de una maestra y dos secundarias. La

tercera secundaria se coloca buscando obtener los mejores resultados con las otras dos.

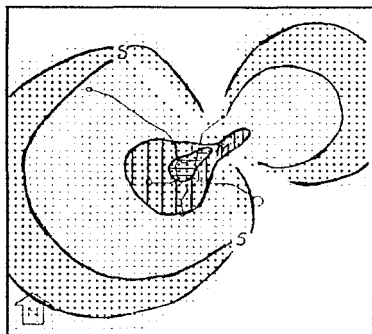


figura 5.15

En la primera gráfica se colocaron la maestra en San Martín Texmelucan, Tlax. y las secundarias en Camargo, Qro. e Izúcar de Matamoros, Pue. Es importante que las antenas se encuentren en alguna población ya que a la hora de instalarse deberán contar con energía eléctrica.

Al llevar a cabo la impresión de la imagen en blanco y negro, los colores de la imagen se identifican por el tono de cada punto. El área que se desea cubrir con esta configuración es el Distrito Federal, el cual, en buena parte, se encuentra dentro de la zona de menor error. Con la tercera secundaria se buscará mejorar la cobertura en otras áreas.

La figura 5.16 muestra la configuración con una antena secundaria en Atlaconomulco Edo. de Méx. en lugar de Izúcar de Matamoros. La zona de Pachuca y otra cercana a Querétaro están mejor cubiertas ahora.

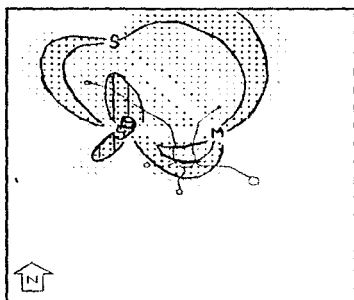


figura 5.16

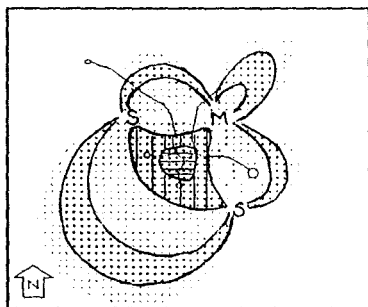


figura 5.17

En la figura 5.17 se ve la configuración obtenida con las antenas secundarias en Atlacomulco e Izúcar de Matamoros.

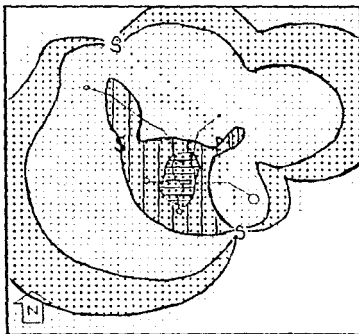


figura 5.18

La parte sur del área metropolitana está en la zona de menor error. También se mejoran las ciudades de Toluca, Cuernavaca y Puebla.

El área total que se muestra en la última figura incluye no sólo al Distrito Federal, sino también a las ciudades de Cuernavaca y Toluca y buena parte de las carreteras que llegan a la Ciudad de México. Puebla y Querétaro se encuentran en una área de error más grande.

## Enlace de VHF

El enlace de comunicación con la estación central se realizará en un canal de radio en VHF. Puede utilizarse FSK para modular la portadora de la misma manera que se utilizó en el primer ejemplo.

Si se utilizan los resultados de Neham [22] se tiene que en una zona urbana se puede tener un área de cobertura de 44 kilómetros de radio con un 90% de los mensajes recibidos correctamente y 72 kilómetros pero con 50% de las señales recibidas correctamente. Recordando que se había establecido un radio de 30 km, los resultados experimentales anteriores muestran que la cobertura de la ciudad podrá hacerse si se utiliza una antena de 150 pies en la central, antenas transmisoras a 6 pies de altura, con 6 dB de ganancia y una potencia de 100 W.

## FUNCIONES DE LA CENTRAL

En la central se procesarán los datos enviados por las unidades móviles. El diagrama de estados correspondiente es el siguiente:

### *ESTADO 1*

En el estado 1 se transmite una señal que sincroniza a todos los usuarios. Corresponde a la mini ranura del final del tiempo T (figura 5.algo)

### *ESTADO 2*

En el estado 2 se espera a que los usuarios se pongan de acuerdo sobre quien utilizará la ranura y se reciba un paquete.

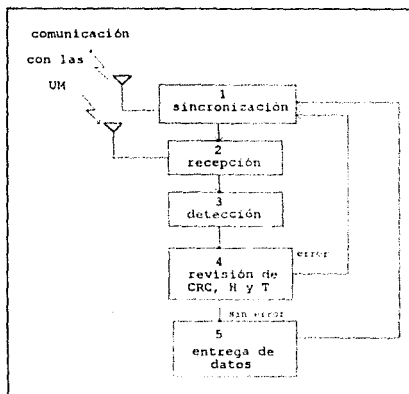


figura 5.19

### ESTADO 3

El estado 3 demodula la señal recibida

### ESTADO 4

En el estado 4 se revisa la información obtenida. En caso de que exista un error o no se reciba el paquete completo, se regresa al estado 1. Si no hubo error y el mensaje recibido fue completo se pasa al estado 5 y último.

### ESTADO 5

Los datos se entregan a una unidad de despliegue. Esta puede hacerse sobre un plano urbano de la zona así se puede identificar el lugar donde se



encuentra la unidad. Si se detiene se puede ver fácilmente si es una parada oficial (preestablecida) o si no lo es. Las desviaciones de la ruta se pueden estudiar para ver la nueva ruta y el lugar hacia donde se dirige la UM.

Se pueden elaborar archivos para cada unidad móvil para llevar un control semanal, quincenal o mensual del desempeño de los conductores.

## CONCLUSIONES

La instalación de LORAN alcanza a cubrir bastante más que el área metropolitana de la Ciudad de México por lo que se podría instalar el mismo sistema en otras de las ciudades cercanas. También se puede utilizar para otros aplicaciones de radio localización.

El protocolo MSAP resulta más conveniente para las características planteadas aquí, pero si se aumentara el número de unidades móviles podría resultar mejor utilizar polling. Los protocolos de contención no son recomendables ya que las necesidades de comunicación no son lo suficientemente bajas y puede presentarse serio problemas por colisiones.

En una zona urbana puede ser difícil encontrar una banda libre del espectro cerca de 150 MHz por lo que los resultados sobre el enlace en VHF pueden variar. Para esto se debe consultar a la SCT y si no se puede utilizar ninguna frecuencia cercana se tendría que buscar otra, mayor o menor, y realizar otro análisis.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo de análisis presentado en esta tesis ofrece al lector:

1. Las características más importantes sobre los sistemas de radio localización GPS, LORAN y Proximity.
2. Elementos para elegir la tecnología adecuada dependiendo de las características propias de un caso a resolver y las ventajas y desventajas de cada una.
3. Algunas aplicaciones terrestres de la radio localización.
4. Fundamentos para elaborar un diseño, en un nivel inicial, a manera de bloques de un sistema de radio localización.

Los sistemas de comunicación entre las unidades móviles y las centrales están limitados a la distancia de los enlaces y la utilización de una banda de frecuencia libre. Para distancias que no pueden ser cubiertas con un enlace de UHF o VHF se sugiere un enlace de HF por propagación ionosférica o bien un enlace vía satélite. Es posible eliminar el enlace con la central si no se requiere la información en tiempo real. En la unidad móvil se pueden guardar los datos de posición y cuando la unidad regresa a la central se lee la información y se revisa la ruta recorrida.

Los ejemplos de diseño del capítulo 5 muestran algunos aspectos que deben ser desarrollados con mayor detenimiento antes de pensar en recurrir a uno de estos sistemas. De ninguna manera se propone que estos ejemplos estén

en un estado terminal, ya que el objetivo de esta tesis es el análisis de las tecnologías de radio localización resumido en los cuatro puntos anteriores. El diseño que se presenta puede ser profundizado en tesis futuras.

La radio localización, al igual que otros sistemas de ingeniería, requiere de diferentes áreas de estudio para poder hacer un diseño completo. En este caso en particular, se debe conocer:

- fenómenos de propagación, radiación y antenas,
- programación y manejo (posibilidades y limitaciones) de microprocesadores y microcontroladores,
- protocolos
- satélites
- transmisores y receptores de radio, y modulación de señales
- trámites legales, licencias, permisos, ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

y algunas otras como la encriptación de mensajes, dependiendo de la situación donde se aplique la tecnología.

Es importante dar mayor difusión a la radio localización en México. Lo que en un principio comenzó como tecnologías exclusivamente militares ahora ha cobrado gran importancia en desarrollos civiles y México debe estar al día. En la clasificación de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería no hay libros de radio localización, LORAN o GPS. En la biblioteca de posgrado existen algunos títulos en revistas. En comparación, la Universidad de California en Berkeley tiene más de 200 clasificaciones sobre el tema.

El trabajo presentado en esta tesis intenta promover la investigación y el desarrollo sobre este tema en la Facultad de Ingeniería y en nuestro país.

## REFERENCIAS:

- [1] Radio Regulations, Chapter I, Terminology, Article 1, Terms and Definitions, 1982
- [2] STUART, George E., "Maya Heartland Under Siege", *National Geographic*, Vol. 182, No. 5, November 1992, pp. 95-107
- [3] HORNOCKER, Maurice G., "Learning to Live With Mountain Lions", *National Geographic*, Vol. 182, No. 1, July 1992, pp. 52-65
- [4] SKOMAL, Edward N., Automatic Vehicle Locating Systems, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [5] PISANO et al, *Using GPS to Calibrate Loran-C*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. 27, No. 4, July 1991.
- [6] KENNEDY, George, Electronic Communication Systems, McGraw-Hill International Editions, 1985
- [7] KAPLAN, Gerald S., RITZIE, Andrew D., *An X-Band System Using Semipassive Signpost Reflectors for Automatic Location and Tracking of Vehicles*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-26, No. 1 February 1977.
- [8] COLLIN E. Robert, Antennas and Radiowave Propagation, McGraw-Hill International Editions, 1985.

[9] HAULSEN, Robert A., *The Promise of Automatic Vehicle Identification*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-26, No. 1 February 1977.

[10] RITER, Stephen, *Automatic Vehicle Location-An Overview*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-26, No. 1 February 1977.

[11] JOHANNESSEN, R., *GPS as a Component in Land Mobile Navigation*, STC Technology Limited.

[12] YOUNG, W. Rae Jr., *Comparison of Mobile Radio Transmission at 150, 450, 900, and 3700 Mc*, Bell Syst. Tech. J. vol. 31, Nov, 1952.

[13] ROM, Raphael, SIDI Moshe, Multiple Access Protocols, Performance and Analysis, Springer-Verlag, 1990.

[14] OKUMURA, Yoshihisa, OHMORI, Eiji, KAWANO, Tomihiko, FUKUDA, Kaneharu, *Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service*, Rev. Elec. Commun. Lab., vol 16, Sept-Oct 1968.

[15] JOHNK, Carl T.A., Ingeniería Electromagnética, campos y ondas, Limusa 1981.

[16] SCHWARTZ, Mischa, Information Transmission, Modulation and Noise, McGraw-Hill Kogakusha, LTD 1959.

[17] NET FONT, Francisco Javier, Teoría Básica de Radiación y Propagación Electromagnética, Noriega Editores 1989.

[18] BULLINGTON, Kenneth, *Radio Propagation for Vehicular Communications*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-26, November 1977

[19] YOUNG, Paul H., Electronic Communication Techniques, Merrill Publishing Company 1985.

[20] Federal Radionavigation Plan (1988)  
DOT-TSC-RSPA-88-4, Dept. of Transportation, Washington D.C., Dec. 1988.

[21] LEICK, Alfred, GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 1990.

[22] MILLER, Irwin, FREUND, John E., Probabilidad y Estadística para ingenieros, Prentice-Hall 1985.

[23] NEHAM, Edward A., An Approach to Estimating Land Mobile Radio Coverage, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol VT-23, November 1974.

## APÉNDICE

### DESARROLLO DEL PROGRAMA QUE DETERMINA EL ÁREA DE COBERTURA DE UN SISTEMA LORAN DE CUATRO ANTENAS

La estructura general se presenta como diagrama de flujo en la figura A.1.

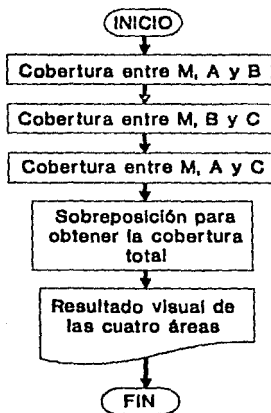


figura A.1

Los tres primeros bloques forman parte de un mismo programa en el cual se obtiene una serie de valores en forma de coordenadas X, Y, y Z, donde Z representa al valor del error de posición del sistema. El cuarto bloque representa un segundo programa que, para obtener la cobertura total del sistema, lee la información de los archivos creados por el primer programa y obtiene la superposición de los valores obtenidos para cada combinación de las antenas, esto con el fin de obtener el mejor valor de posición de cada combinación de las antenas. El resultado de este programa se guarda en un archivo diferente que será utilizado por un tercer y último programa, el quinto bloque, que se encarga de mostrar visualmente las áreas de cobertura.

Las diferencias de tiempo que se registran entre las señales enviadas por una antena maestra y dos secundarias en el aparato receptor se utilizan como base del sistema. El programa calcula el error de localización a partir de la siguiente ecuación:

$$d_{rms} = 1/2 c K \tau \Sigma \quad (A.1)$$

donde:  $d_{rms}$  es el error de posición en metros,  
 $c$  la velocidad de la luz,  
 $K$  un parámetro geométrico que depende de la posición del receptor,  
 $\tau \Sigma$  la variancia de la línea de posición del receptor y es función de las mediciones en las diferencias de tiempo.



Para llevar a cabo el análisis del error de posición, se escoge un lugar para cada una de las tres antenas del sistema y se ubica a un receptor en un punto cualquiera. Con esta distribución geométrica se generan dos hipérbolas que tienen como foco común las coordenadas de la antena maestra (M), y las de las antenas secundarias como el otro foco (A y B). Las líneas entre la maestra y las secundarias representan a los ejes de simetría respectivos. Las hipérbolas se intersectan en la posición del receptor (P). Para cada una de las hipérbolas se obtiene la ecuación de la recta que le es tangente en el punto P, y se calcula la intersección de dicha recta con el eje de simetría de la hipérbola. En las intersecciones obtenidas se obtienen los ángulos entre las rectas tangentes y los ejes de simetría de cada una de las parábolas y además el ángulo entre las dos rectas tangentes. Estos ángulos se utilizan para obtener el parámetro K a partir de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{\sqrt{(\text{sen } \theta_1)^2 + (\text{sen } \theta_2)^2}}{(\text{sen } \theta)(\text{sen } \theta_1)(\text{sen } \theta_2)} \quad (\text{A.2})$$

Los ángulos utilizados  $\theta$ ,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se representan en la figura A.2 junto con las antenas M, A y B y las líneas correspondientes.

Una vez que se calcula el error de localización para un punto de la zona se procede de la misma forma en un punto adyacente al recién analizado. De esta manera se efectúa un barrido de toda la zona de interés. El número N de puntos donde se conoce el error nos permite tener una idea de la cobertura de la zona en cualquier localidad de esta.

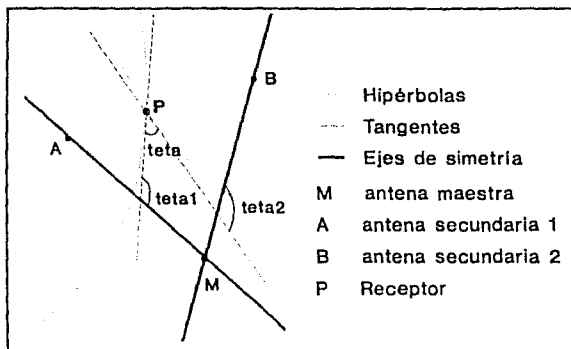


figura A.2

La función del primer programa es la de realizar iterativamente las evaluaciones ya mencionadas. Para esto el programa necesita como parámetros la magnitud del área a evaluar, las coordenadas de localización de las antenas y la tabulación para determinar la densidad de puntos evaluados. La figura A.3 muestra el diagrama de flujo utilizado para obtener las coordenadas X, Y,  $d_{rms}$  en el primer programa.

El algoritmo empleado se concreta al caso de una antena maestra y dos secundarias. Para poder evaluar el caso de una antena maestra y tres secundarias el programa repite el algoritmo tres veces; una para cada combinación de la maestra y dos secundarias. Los valores obtenidos para cada

iteración se van guardando en tres archivos distintos, uno para cada combinación de antenas.

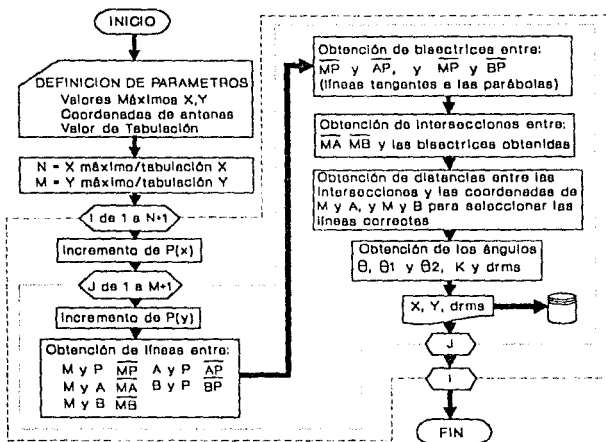


figura A.3

La superposición de las tres áreas de cobertura se lleva a cabo comparando los valores del error de posición en cada uno de los archivos generados por el primer programa. Para cada par de valores X y Y, se selecciona el menor valor de  $d_{rms}$  y se guarda éste en un nuevo archivo.

El último programa se encarga de mostrar visualmente el resultado de los cálculos realizados. Para graficar la cobertura según el error de posición, se utiliza un color para cada punto dependiendo del valor numérico de su error. Así el color va variando para cierto rango de valores dando una idea muy clara del área de cobertura. El programa además grafica las ciudades de México D.F., Toluca, Puebla, Pachuca, Cuernavaca y Querétaro, así como las carreteras que las conectan con la idea de que la ubicación de las antenas y la cobertura sea más clara.

Las cuatro figuras siguientes son un ejemplo de las áreas de cobertura que se pueden obtener con el programa.

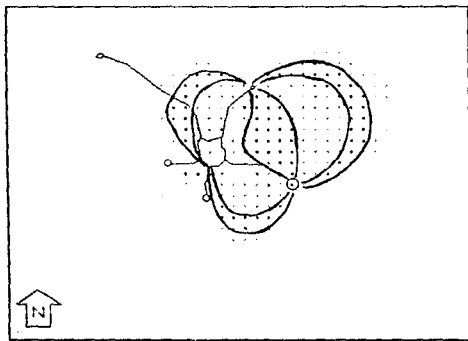


figura A.4

La figura A.4 muestra el área obtenida con tres antenas, la maestra en el sur de la Ciudad de México, las secundarias en Pachuca, Hidalgo y en Puebla, Puebla. El tono de cada punto es equivalente al color correspondiente en la pantalla.

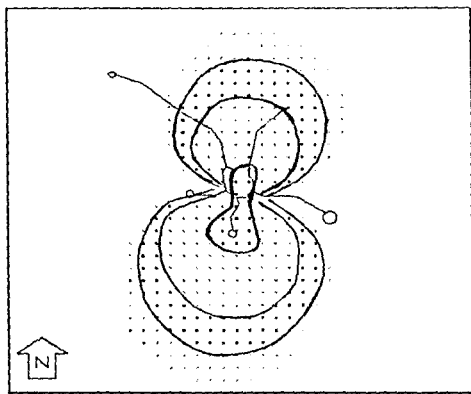


figura A.5

En la figura A.5 se utiliza la misma central y secundaria de Puebla, y la otra secundaria se colocó al 20 kilómetros oeste de Toluca.

En la siguiente figura se ve la cobertura con las secundarias en Pachuca y al oeste de Toluca.

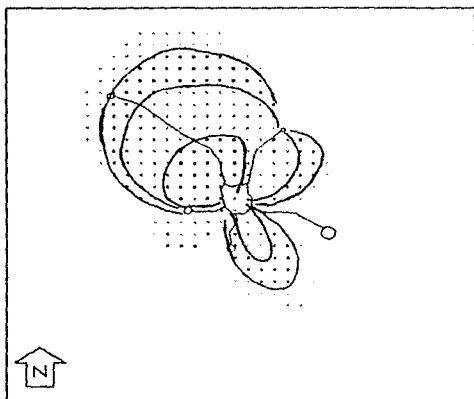


figura A.6

La última figura muestra la superposición de las imágenes anteriores. El área que se abarca con la disposición de las antenas no es la mejor si se quisiera dar algún servicio en el área metropolitana de la Ciudad de México. Además se ve que las zonas de menor error se encuentran en las carreteras o entre ciudades. Con este ejemplo se pretendía mostrar el funcionamiento del programa con una disposición diferente a la mostrada en el capítulo 5 donde se propone una mejor cobertura.

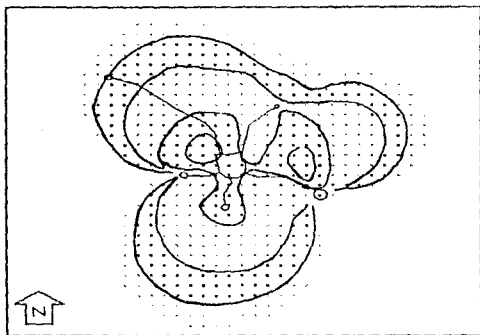


figura A.7

Los programas desarrollados se presentan a continuación.

**Programa 1**

\$DEBUG

```

DIMENSION A(2),B(2),C(2),D(2),E(2),P(2),W(2),z(2)
REAL L1,L2,L3,LL1,LL2,LL3,LP1,LP2,LP3,LLP1,LLP2,LLP3
REAL LS1,LS2,LS3,LSS1,LSS2,LSS3
open
(10,file='drms3.dat',form='formatted',STATUS='unknown')
DATA
XMAX/480/,YMAX/480/,DELX/10./,DELY/10./,a(1)/287.0/,
+ a(2)/278.0/,b(1)/162.0/,b(2)/278.0/,c(1)/146.0/,
+ c(2)/425.0/,d(1)/313.0/,d(2)/148.0/

write(*,*)'Definicion de parametros'
write(*,*)'(Para dejar los defaults, teclear 0) '
write(*,*)
write(*,*)'Valores maximos'
write(*,*)'xmax=',xmax
read(*,25)xax
if(xax.ne.0.)xmax=xax
write(*,*)'ymax=',ymax
read(*,25)yax
if(yax.ne.0.)ymax=yax

```

```

write (*,*)
write (*,*)'Ubicacion de las antenas'
write (*,*)'Maestra:'
write(*,*)'mx=',a(1),' my=',a(2)
read(*,25)aal,aa2
if(aal.eq.0)go to 35
a(1)=aal
a(2)=aa2
35  continue
write (*,*)'Antena A:'
write(*,*)'ax=',b(1),' ay=',b(2)
read(*,25)aal,aa2
if(aal.eq.0)go to 45
b(1)=aal
b(2)=aa2
45  continue
write (*,*)'Antena B:'
write(*,*)'bx=',c(1),' by=',c(2)
read(*,25)aal,aa2
if(aal.eq.0)go to 55
c(1)=aal
c(2)=aa2
55  continue
write (*,*)'Antena C'
write(*,*)'cx=',d(1),' cy=',d(2)
read(*,25)aal,aa2
if(aal.eq.0)go to 60
d(1)=aal
d(2)=aa2
60  continue
25  format(2f10.4)
write(*,*)
write(*,*)'Valor de Tabulacion'
write(*,*)'delx=',delx,' dely=',dely
read(*,25)aal,aa2
if(aal.eq.0)go to 65
if(aa2.eq.0)then
  write (*,*)'Dely=0, dar nuevo valor para dely.'
  read (*,')aa2
end if
delx=aal
dely=aa2
65  continue

c  ***** PROGRAMA PRINCIPAL *****

C  write (*,*)
  write (*,*)'Valores obtenidos para M, A y B:'

75  continue

```



```

C      f(X,Y) CORRESPONDE X-1, Y-2
      P(1)=-DELX
      P(2)=-DELY
      N = XMAX/DELX
      M = YMAX/DELY
      DO 20 I = 1,N+1
      P(1)=(I-1)*DELX
      DO 30 J = 1,M+1
      P(2)=(J-1)*DELY
      CALL DIS(A,B,AB)
      CALL DIS(A,C,AC)
      CALL LINEA(A,P,A1,B1,P1)
      CALL LINEA(B,P,A2,B2,P2)
      CALL LINEA(C,P,A3,B3,P3)
      CALL LINEA(A,B,A4,B4,P4)
      CALL LINEA(A,C,A5,B5,P5)
      CALL BIS(A1,B1,P1,A2,B2,P2,L1,L2,L3,LP1,LP2,LP3)
      CALL BIS(A1,B1,P1,A3,B3,P3,LL1,LL2,LL3,LLP1,LLP2,LLP3)
      CALL INTER(A4,B4,P4,L1,L2,L3,W)
      CALL INTER(A4,B4,P4,LP1,LP2,LP3,Z)
      CALL DIS(A,W,AW)
      CALL DIS(B,W,BW)
      CALL DIS(A,Z,AZ)
      CALL DIS(B,Z,BZ)
      D1=AW+BW
      D2=AZ+BZ
      IF(D1.lt.D2) THEN
        LS1=L1
        LS2=L2
        LS3=L3
      END IF
      IF(D1.gt.D2) THEN
        LS1=LP1
        LS2=LP2
        LS3=LP3
      END IF
      if (d1.eq.d2) then
        ls1=cos(1.570795+acos(a4))
        ls2=cos(1.570795+acos(b4))
        ls3=p4
      end if
      CALL INTER(A5,B5,P5,LL1,LL2,LL3,W)
      CALL INTER(A5,B5,P5,LLP1,LLP2,LLP3,Z)
      CALL DIS(A,W,AW)
      CALL DIS(C,W,CW)
      CALL DIS(A,Z,AZ)
      CALL DIS(C,Z,CZ)
      D1=AW+CW
      D2=AZ+CZ
      IF(D1.lt.D2) THEN
        LSS1=LL1

```

```

        LSS2=LL2
        LSS3=LL3
    END IF
    IF (D1.gt.D2) THEN
        LSS1=LLP1
        LSS2=LLP2
        LSS3=LLP3
    END IF
    if (d1.eq.d2) then
        lss1=cos(1.570795+acos(a5))
        lss2=cos(1.570795+acos(b5))
        lss3=p5
    end if
    if (lss2.eq.0) lss2=0.001
    if (lss2.eq.0) lss2=0.001
    XM2=-LSS1/LSS2
    XM1=-LS1/LS2
    XSUB =1+XM1*XM2
    IF (XSUB.EQ.0) XSUB=0.001
    TANTETA=abs((XM2-XM1)/XSUB)
    TETA=ATAN(TANTETA)
    IF (TETA.GT.3.1416) TETA=TETA - 3.1416
    IF (TETA.GT.3.1416/2.) TETA=3.1416 - TETA
    XM2=-A2/B2
    XM1=-A1/B1
    XM3=-A3/B3
    XSUB =1+XM1*XM2
    IF (XSUB.EQ.0) XSUB=0.001
    TANTETA=abs((XM2-XM1)/XSUB)
    TETA1=ATAN(TANTETA)/2
    IF (TETA1.GT.3.1416) TETA1=TETA1 - 3.1416
    IF (TETA1.GT.3.1416/2.) TETA1=3.1416 - TETA1
    XSUB =1+XM1*XM3
    IF (XSUB.EQ.0) XSUB=0.001
    TANTETA=abs((XM3-XM1)/XSUB)
    TETA2=ATAN(TANTETA)/2
    IF (TETA2.GT.3.1416) TETA2=TETA2-3.1416
    IF (TETA2.GT.3.1416/2.) TETA2=3.1416 - TETA2
    c      WRITE(*,*) TETA, TETA1, TETA2
    XKG=SQRT(SIN(TETA1)**2+SIN(TETA2)**2)
    YXKG=(SIN(TETA)*SIN(TETA1)*SIN(TETA2))
    if (xkg.eq.0.and.yxkg.eq.0) xkg=0.1
    IF (YXKG.EQ.0) YXKG=0.001
    XKG=XKG/YXKG
    DRMSDOS=30.0*XKG
    if (drmsdos.gt.700.) drmsdos=700
    WRITE(10,10) P(1), P(2), DRMSDOS
    c      WRITE(*,*) P(1), P(2), DRMSDOS
    10    format(2x, f10.2, 5x, f10.2, 2x, f10.2)
    30    CONTINUE
    20    CONTINUE

```

```

c      se efectua el segundo barrido con la maestra, b y c
      if (k.eq.2) go to 85
      close (10,status='keep')
      open
(10,file='drms4.dat',form='formatted',STATUS='unknown')
      write (*,*) 'Valores obtenidos para M, B y C:'
      k=2
      e(1)=b(1)
      e(2)=b(2)
      b(1)=c(1)
      b(2)=c(2)
      c(1)=d(1)
      c(2)=d(2)
      goto 75
85     continue
c      se efectua el tercer barrido con la maestra, a y c
      if (k2.eq.2) go to 95
      close (10,status='keep')
      open
(10,file='drms5.dat',form='formatted',STATUS='unknown')
      write (*,*) 'Valores obtenidos para M, A y C:'
      k2=2
      b(1)=e(1)
      b(2)=e(2)
      goto 75
95     continue
      END

      SUBROUTINE DIS(A,B,D)
      distancia entre dos puntos
      DIMENSION A(2),B(2)
      D=SQRT((A(1)-B(1))**2+(A(2)-B(2))**2)
      RETURN
      END

      SUBROUTINE LINEA(A,B,A1,B1,P1)
      Ec. de la recta de Hesse
      DIMENSION A(2),B(2)
      DP = A(1)-B(1)
      IF (DP.EQ.0.0)DP=0.001
      AA = (A(2)-B(2))/DP
      BB = -1.
      CC = A(2) - AA * A(1)
      RR = SQRT ( AA * AA + BB * BB)
      IF ( CC .NE. 0.) THEN
        IF ( CC .LT. 0.) THEN
          RR = RR
        ELSE
          RR = - RR
        ENDIF
      ENDIF

```

```

ELSE
  IF ( BB .NE. 0.) THEN
    IF ( BB .LT. 0.) THEN
      RR = - RR
    ELSE
      ENDIF
  ELSE
    IF ( AA .LT. 0.) THEN
      RR = - RR
    ELSE
      ENDIF
  ENDIF
ENDIF

```

```

A1 = AA / RR
B1 = BB / RR
P1 = - CC / RR
RETURN
END

```

c

```

SUBROUTINE BIS(A1,B1,P1,A2,B2,P2,L1,L2,L3,LP1,LP2,LP3)
obtiene la bisectriz
REAL L1,L2,L3,LP1,LP2,LP3
L1 = A1 - A2
L2 = B1 - B2
L3 = P1 - P2
LP1 = A1 + A2
LP2 = B1 + B2
LP3 = P1 + P2
IF(L2.EQ.0)L2=0.001
IF(LP2.EQ.0)LP2=0.001
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE INTER(A,B,C,D,E,F,X)
obtiene la intersección entre dos rectas (punto)
DIMENSION X(2)
DD = A*E - B*D
if(dd.eq.0)dd=0.001
IF (DD.NE.0.)THEN
  X(1)=(E*C-B*F)/DD
  X(2)=(-D*C+A*F)/DD
ELSE
  ENDIF
RETURN
END

```

Programas relacionados:

Programa 2

c234567

```
c      se obtiene la superposición de las áreas individuales
      real zd,z3,z4,z5,x,y

      open (1,file='drms3.dat',status='unknown')
      open (2,file='drms4.dat',status='unknown')
      open (3,file='drms5.dat',status='unknown')
      open (4,file='drms6.dat',status='unknown')

10     continue
      read (1,*,end=20)x,y,z3
      read (2,*,end=20)x,y,z4
      read (3,*,end=20)x,y,z5

      zd=z3
      if (zd.gt.z4)zd=z4
      if (zd.gt.z5)zd=z5
      write (4,*)x,y,zd
      goto 10
20     continue
      end
```

Programa 3

c234567

```
c      grafica los resultados obtenidos

      include 'FGRAPH.FI'

      STRUCTURE /videoconfig/
      INTEGER*2 numxpixels
      INTEGER*2 numypixels
      INTEGER*2 numtextcols
      INTEGER*2 numtextrows
      INTEGER*2 numcolors
      INTEGER*2 bitsperpixel
      INTEGER*2 numvideopages
      INTEGER*2 mode
      INTEGER*2 adapter
      INTEGER*2 monitor
      INTEGER*2 memory
      END STRUCTURE
```

```

real x(2000), y(2000),z(2000)
CALL graphicsmode()
call clearscreen ($GCLREARSCREEN)
OPEN (1,file='drms3.dat',status='unknown')
OPEN (2,file='drms4.dat',status='unknown')
OPEN (3,file='drms5.dat',status='unknown')
OPEN (4,file='drms6.dat',status='unknown')

10  continue
    do l=1,4
        i=1
        fin=0
11  continue
    read (l,*,err=12)x(i),y(i),z(i)
    if (z(i).ge.550)goto 11
    if (i.eq.2000) goto 13
    i=i+1
    goto 11
12  continue
    i=i-1
    fin=32
13  do j=1,i
    call colores(z(j))
    call graficar(x(j),y(j))
    end do
    if (fin.eq.32) goto 30
    goto 10
30  continue
    call ejes()
    CALL ciudades()
    read(*,*)
    close (1,status='keep')
    call clearscreen ($GCLREARSCREEN)
    end do
    call endprogram
    end

SUBROUTINE ejes ()
include 'FGRAPH.FD'
integer*2 dummy
record /xycoord/xy

dummy = setcolor (15)
CALL moveto (0,-479,xy)
dummy = lineto ( 0,0)
dummy = lineto (600,0)
c  referencia al norte
call moveto (20,-16,xy)
dummy = lineto (20,-44)
dummy = lineto (8,-44)
dummy = lineto (34,-62)

```

```
dummy = lineto (61,-44)
dummy = lineto (48,-44)
dummy = lineto (48,-16)
dummy = lineto (20,-16)
call moveto (28,-28,xy)
dummy = lineto (28,-40)
dummy = lineto (40,-28)
dummy = lineto (40,-40)
END
```

```
SUBROUTINE ciudades()
INCLUDE 'FGRAPH.FD'
integer*2 dummy
record /xycoord/xy
```

```
dummy = setcolor(15)
C grafica Toluca, Queretaro, Cuernavaca, Puebla, Pachuca
dummy = ellipse ($GBORDER,185,-221,193,-228)
dummy = ellipse ($GBORDER,105,-357,113,-363)
dummy = ellipse ($GBORDER,231,-175,238,-183)
dummy = ellipse ($GBORDER,330,-190,344,-204)
dummy = ellipse ($GBORDER,288,-318,293,-323)
C d.f
CALL moveto (228,-256,xy)
dummy =lineto (224,-248)
dummy =lineto (228,-228)
dummy =lineto (236,-220)
dummy =lineto (248,-220)
dummy =lineto (256,-228)
dummy =lineto (256,-240)
dummy =lineto (252,-244)
dummy =lineto (252,-256)
dummy =lineto (236,-252)
dummy =lineto (228,-256)
C carreteras
C Mex-Tol
CALL moveto (228,-228,xy)
dummy =lineto (218,-223)
dummy =lineto (193,-223)
C Mex-Cuer
CALL moveto (238,-220,xy)
dummy =lineto (241,-213)
dummy =lineto (232,-197)
dummy =lineto (234,-183)
C Mex-Qro
CALL moveto (228,-256,xy)
dummy =lineto (222,-284)
dummy =lineto (212,-298)
dummy =lineto (185,-314)
dummy =lineto (140,-350)
dummy =lineto (112,-360)
```

```

c      Mex-Pach
      CALL moveto (252,-256,xy)
      dummy =lineto (260,-294)
      dummy =lineto (278,-310)
      dummy =lineto (288,-318)
c      Mex-Pueb
      CALL moveto (256,-228,xy)
      dummy =lineto (266,-222)
      dummy = arc(256,-222,304,-218,300,-220,266,-222)
      CALL moveto (304,-220,xy)
      dummy =lineto (332,-203)
      end

c      nuevas coordenadas y las grafica

      subroutine graficar (xr,yr)
      include 'FGRAPH.FD'
      INTEGER*2 dummy
      record /xycoord/xy
      real xr,yr

      CALL moveto ((xr-1),-(yr+1),xy)
      dummy =lineto ((xr+1),-(yr+1))
      CALL moveto ((xr-1),-yr,xy)
      dummy =lineto ((xr+1),-yr)
      CALL moveto ((xr-1),-(yr-1),xy)
      dummy =lineto ((xr+1),-(yr-1))
      END

c      colores
      subroutine colores(zr)
      include 'FGRAPH.FD'
      integer*2 dummy

      if (zr.le.700.and.zr.ge.550) then
        dummy = setcolor(0)
      end if
      if (zr.lt.550.and.zr.ge.400) then
        dummy = setcolor(4)
      end if
      if (zr.lt.400.and.zr.ge.250) then
        dummy = setcolor(10)
      end if
      if (zr.lt.250.and.zr.ge.100) then
        dummy = setcolor(5)
      end if
      if (zr.lt.100.and.zr.ge.70) then
        dummy = setcolor(11)
      end if
      if (zr.lt.70) then
        dummy = setcolor(15)
      end if

```



```
end if
end
```

```
SUBROUTINE graphicsmode()
```

```
INCLUDE 'FGRAPH.FD'
```

```
INTEGER*2          dummy, maxx, maxy
RECORD /videoconfig/ myscreen
record /xycoord/xy
COMMON             maxx, maxy
```

```
call getvideoconfig (myscreen)
SELECT CASE ( myscreen.adapter )
  CASE ($CGA )
    dummy = setvideomode ($HRESBW)
  CASE ( $OCGA )
    dummy = setvideomode ($ORESCOLOR)
  CASE ( $EGA, $OEGA )
    IF ( myscreen.monitor.eq.$mono ) then
      dummy = setvideomode ( $eresnocolor )
    ELSE
      dummy = setvideomode ( $erescolor )
    end if
  CASE ($VGA,$OVGA, $MCGA)
    dummy = setvideomode ($VRES16COLOR)
  CASE ($HGC)
    dummy = ($hercmono)
  CASE DEFAULT
    dummy = 0
end select

IF (dummy.EQ.0) STOP 'ERROR'
call setvieworg (0,479,xy)
END
```

```
c  endprogram
```

```
SUBROUTINE endprogram ()
include 'FGRAPH.FD'
```

```
INTEGER*2 dummy
dummy = setvideomode ( $DEFAULTMODE )
END
```