

## RECOMENDACIÓN UIT-R F.1337\*

**GESTIÓN DE FRECUENCIAS DE SISTEMAS RADIOELÉCTRICOS Y REDES  
EN ONDAS DECAMÉTRICAS ADAPTABLES QUE UTILIZAN SONDEO  
CON INCIDENCIA OBLICUA MEDIANTE ONDAS CONTINUAS  
MODULADAS EN FRECUENCIA**

(Cuestión UIT-R 205/9)

(1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) la necesidad de contar con servicios de comunicación en ondas decamétricas muy fiables;
- b) la limitada disponibilidad de espectro en ondas decamétricas para la transmisión vocal y de datos;
- c) las limitaciones de la ionosfera, variable con el tiempo, que restringen el número de canales utilizables dentro del espectro disponible;
- d) que disponer de técnicas reguladoras y de gestión de frecuencias eficaces y eficientes es indispensable para optimizar la utilización de las frecuencias en los servicios fijos y algunos servicios móviles entre 1,6 y 28 MHz;
- e) que los estudios experimentales, esbozados en el Anexo 1, han mostrado que pueden conseguirse mejoras sustanciales en la utilización de canales mediante la diversidad en frecuencia y en trayecto;
- f) que los esquemas de sondeo de incidencia oblicua mediante ondas continuas moduladas en frecuencia (FMCW – frequency modulated continuous wave) hacen posible una evaluación precisa en tiempo real de los canales de ondas decamétricas de los que puede disponer una red, sentando así las bases de una gestión dinámica de frecuencias;
- g) que el método de sondeo mediante FMCW «chirp» puede aplicarse de modo que se limite la interferencia perjudicial y que es posible su realización práctica como un proceso externo, con lo que se eliminarían reducciones de la capacidad de los sistemas,

*recomienda*

- 1** que se considere la posibilidad de aplicar esquemas de gestión automática y adaptable en las redes en ondas decamétricas adaptables para incluir la selección dinámica de frecuencias óptimas, la compartición de frecuencias dentro de una red y la selección adaptable de trayectos de red alternativos;
- 2** que se considere la utilización del sondeo mediante FMCW «chirp» en los esquemas dinámicos de gestión de frecuencias, entre otras cosas:
  - como fuente de datos en tiempo real para actualizar la gestión de recursos y los programas de predicción de la propagación;
  - como medio de actualizar las listas de exploración de frecuencias de los sistemas en ondas decamétricas adaptables;
  - para modificar y mejorar matrices de análisis de calidad de los enlaces para los sistemas en ondas decamétricas adaptables;
  - como complemento de la utilización exclusiva del sondeo de canales en banda, lo que aumentaría la capacidad de comunicaciones de una red y reduciría la interferencia ocasionada por el sondeo de canales;
- 3** que, en el caso de las redes en ondas decamétricas adaptables en los servicios fijo y móvil, se considere la información contenida en el Anexo 1 a efectos de planificación general del espectro y para el diseño de las redes;
- 4** que es necesario realizar más estudios para evaluar las ventajas que tiene la tecnología del sondeo en la gestión de frecuencias de las redes en ondas decamétricas adaptables de carácter regional y mundial, sobre todo las regiones de alta latitud y las ecuatoriales en condiciones de máxima actividad solar.

---

\* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 1 y 8 de Radiocomunicaciones.

## **Investigación a largo plazo del sondeo de incidencia oblicua mediante FMCW como método de gestión dinámica de frecuencias de las redes de comunicación en ondas decamétricas**

### **1 Introducción**

El sondeo con barrido de frecuencias mediante FMCW se ha utilizado en las redes de gestión centralizada del espectro para permitir la evaluación de canales en tiempo real (RTCE – real-time channel evaluation) con múltiples circuitos en ondas decamétricas. Denominados a menudo sondeadores «chirp», estos dispositivos tienen las ventajas propias del sondeo con incidencia oblicua, esto es, pueden utilizarse para optimizar la utilización de frecuencias, mejorar la fiabilidad de los circuitos, evaluar las relaciones señal/ruido y de interferencia y medir los parámetros de propagación ionosférica empleados por ciertos sistemas en ondas decamétricas adaptables. Si se asocian con las redes de gestión centralizada del espectro, estos sondeadores pueden explotarse en números limitados de forma intermitente y con baja potencia, para obtener información sobre la gestión del espectro en tiempo real para múltiples usuarios. Este método reduce por lo general la necesidad de sondear y limita, por otra parte, el tiempo total en que el sondeador funciona en modo cocanal con otros transmisores en ondas decamétricas. El resultado es una mejor información a múltiples usuarios y la reducción de la posibilidad de interferencia a causa del sondeo.

### **2 Concepto de sistema**

En las redes de gestión centralizada del espectro, la información obtenida por sondeo con barrido de frecuencias mediante FMCW puede utilizarse para elaborar gráficos, denominados ionogramas, del retardo temporal de la señal recibida frente a la frecuencia de transmisión. Puesto que el canal ionosférico puede constar de múltiples capas y centros de dispersión que soportan la comunicación en ondas decamétricas, las señales recibidas a una determinada frecuencia experimentarán grados variables de distorsión del retardo temporal. Las líneas de registro del ionograma indican los diversos modos de propagación ionosférica que soportarán la comunicación.

Los ionogramas se obtienen procesando una señal FMCW de baja potencia en una gama seleccionable de frecuencia, normalmente entre 2 y 30 MHz. La calidad de estos ionogramas «chirp» es superior a los obtenidos mediante sondeadores por impulsos para la misma potencia media, ya que los primeros utilizan una forma de onda de espectro ensanchado caracterizada por la ganancia de procesamiento, que se aplica para combatir los efectos de la interferencia en banda estrecha. La potencia media nominal (y la potencia en la cresta de la envolvente) de estos sistemas es de 10 a 100 W o posiblemente menor, dependiendo de las circunstancias.

El sondeo mediante FMCW reduce también el tiempo cuando una determinada frecuencia se encuentra ocupada. La velocidad nominal a la que estos sondeadores realizan el barrido a lo largo de la banda de 2-30 MHz es de 100 kHz/s. En consecuencia, la totalidad de la banda de ondas decamétricas se muestrea en unos 5 min. La separación temporal entre los sucesivos barridos para un determinado transmisor, denominada intervalo de exploración, es normalmente de 15 min, pero puede fijarse en 30 min o más. Por consiguiente, los transmisores con barrido de frecuencias mediante FMCW no sólo consumen poca potencia sino que tienen un efecto momentáneo en otros usuarios de las ondas decamétricas dentro de cada exploración, y el intervalo de exploración es relativamente largo. Cuando un usuario que utiliza el mismo canal se encuentra en la zona de cobertura del sondeador FMCW, un canal típico de 3 kHz puede experimentar un «blip» de 30 ms no más de dos veces por hora, si el intervalo de exploración es de 30 min.

Cuando los sondeadores se utilizan en el marco de una red de gestión centralizada del espectro, su número puede ser limitado, proporcionando de todos modos cobertura regional o mundial a un gran número de usuarios. Este proceso elimina la necesidad de que cada operador de comunicaciones en ondas decamétricas realice su propio sondeo, con lo que se reduce también el número total de sondeos que se necesitan para dar soporte a un determinado número de usuarios. Aunque el sondeo de canales por cada uno de los transmisores proporciona una información útil, puede aumentar la congestión en la gama de frecuencias de ondas decamétricas. El sondeo con barrido de frecuencias mediante FMCW, utilizado junto con redes de gestión centralizada del espectro, puede reducir en gran medida la posibilidad de interferencia debida al sondeo.

### **3 Resultados experimentales de importancia para la Recomendación**

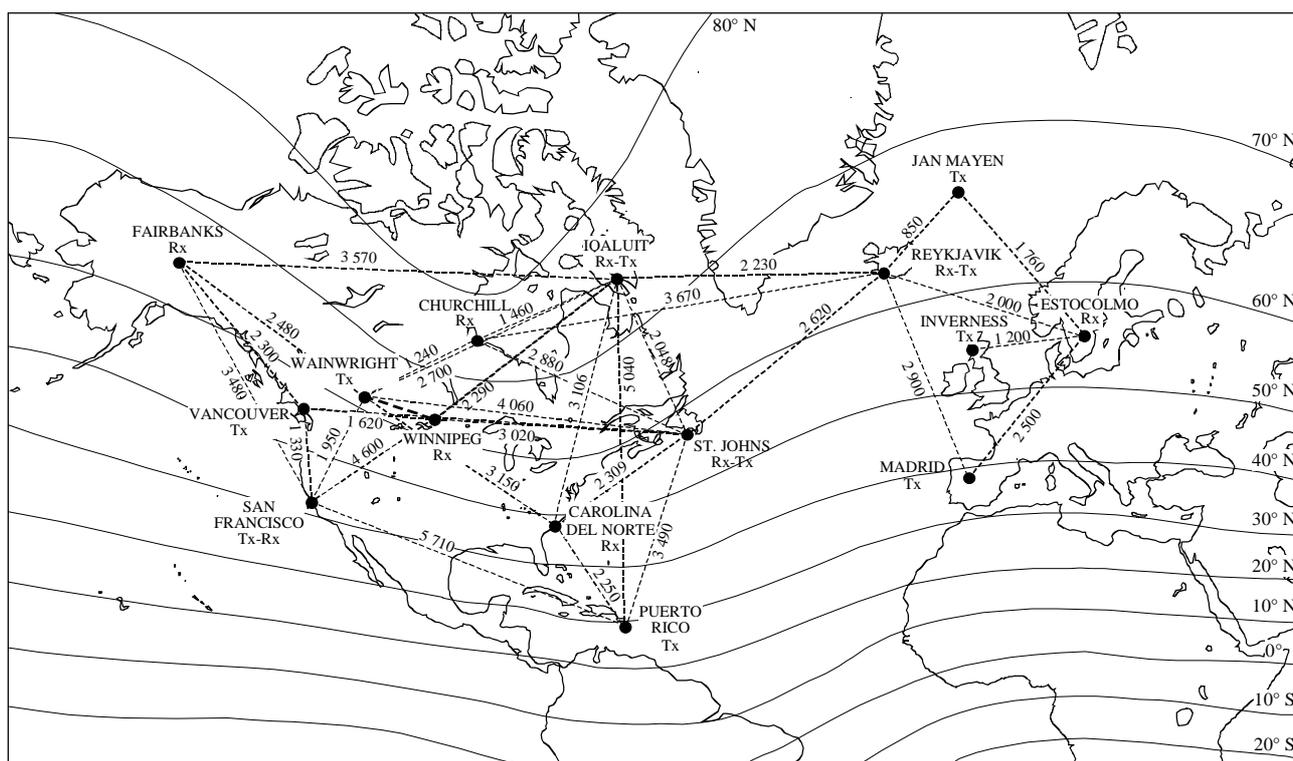
Se han realizado muchos experimentos a lo largo de los años utilizando sondeos de incidencia oblicua con barrido de frecuencias mediante FMCW. Entre 1993 y 1996, periodo de escasa actividad solar, se llevó a cabo un extenso programa experimental sobre las posibilidades de la diversidad en frecuencia y en trayecto. El programa se efectuó en diez lugares del hemisferio Norte. En la Fig. 1 puede verse la geometría del programa. Con esta investigación se pretendía resolver

los problemas relacionados con los sistemas de comunicación en ondas decamétricas adaptables, haciéndose especial hincapié en la comunicación automática de datos digitales. También fueron objeto de interés la propagación radioeléctrica, la gestión de frecuencias y la arquitectura de sistemas. Los trayectos examinados proporcionaron información sobre circuitos en el casquete polar, la zona auroral y las depresiones de latitudes elevadas, así como en los entornos de canales de latitud media.

FIGURA 1

**Geometría de los experimentos de propagación**

Las distancias entre los emplazamientos de los transmisores y los receptores se dan en kilómetros. Los datos se obtuvieron entre 1993 y 1996.



1337-01

Las potencias de los transmisores utilizadas en el experimento estaban comprendidas entre 10 y 100 W, y el intervalo de exploración del sondeador se fijó en 30 min. Se recogieron y analizaron más de 40 años-trayectos de datos, lo que permitió evaluar la disponibilidad de comunicaciones por enlace y redes en estrella en distintas condiciones de diversidad en frecuencias y estación.

No sólo se obtuvo información significativa a partir de los datos recogidos durante los experimentos, sino que además las numerosas operaciones a largo plazo efectuadas dieron pruebas de la reducción de la posibilidad de interferencia resultante de la utilización de sondeadores FMCW en redes de gestión centralizada del espectro. Durante todo el periodo de funcionamiento de los sondeadores FMCW en el marco de la actividad experimentadora realizada entre 1993 y 1996 no hubo ninguna notificación de interferencia.

Las conclusiones que siguen se basan en el análisis de los datos recogidos. Algunas de ellas derivan directamente de los principios axiomáticos de la propagación en ondas decamétricas y la interacción ionosférica.

## 4 Factores relativos al sondeo mediante FMCW

### 4.1 Espectro

Hay que disponer de la cantidad de espectro adecuada para obtener una conectividad óptima, mientras que las condiciones de esa adecuación dependerán, en última instancia, de factores tales como la carga de tráfico. Los estudios de redes en estrella han mostrado que a largo plazo puede alcanzarse una disponibilidad en materia de comunicaciones de casi el 100%, siempre y cuando exista la posibilidad de acceder a varias estaciones en tierra muy separadas entre sí y de realizar selecciones dinámicas basadas en sondeos en tiempo real recurriendo a un conjunto de frecuencias de un número suficiente de bandas distribuidas a lo largo del espectro de ondas decamétricas. Por regla general, las aplicaciones de buena calidad de los servicios fijo y móvil requieren ocho frecuencias. No obstante, el requisito de adecuación, quizás haga necesario disponer de frecuencias adicionales en condiciones de perturbación, ya que en ese caso se reduce el número de trayectos con diversidad, o cuando aumentan las distancias de correlación ionosférica. La recíproca también es cierta, es decir, los requisitos de frecuencia pueden reducirse en condiciones benignas o durante periodos de escasa carga de tráfico.

En general, el número de frecuencias requerido para hacer posibles altos niveles de disponibilidad dependerá del número de estaciones que contribuyan a la capacidad de la red. Se han efectuado pruebas para analizar esta relación y se ha encontrado que la regla siguiente rige en la mayoría de los casos:

$$N_f \sim a + b/N_s \quad (1)$$

donde  $N_f$  es el número de frecuencias,  $N_s$  es el número de estaciones y  $a$  y  $b$  son funciones de la topología de la red (es decir, de la separación entre los nodos), la zona geográfica en la que debe prestarse el servicio de comunicaciones, ciclo diurno, la estación del año y las condiciones solares. Para las condiciones de la prueba, se ha visto que  $a \approx -4$  y  $b \approx 48$  son valores bastante representativos cuando  $3 \leq N_s \leq 5$ , excepto en condiciones de perturbación. También pueden darse condiciones en las que la capa E esporádica es una característica controladora en uno o más trayectos de propagación. La condición de capa E esporádica, cuando está presente, puede hacer que una sola estación utilice tantas frecuencias como sea necesario para acomodar todo el tráfico cursado del foco de una agrupación a la estación terrena, y alcance todavía un alto grado de disponibilidad. En este caso, la diversidad en estación resulta innecesaria y no se cumple la ecuación (1). En el presente Anexo se esboza un sistema de gestión de frecuencias en tiempo real basado en la tecnología FMCW que permite la detección y evaluación de los modos normal y de capa E esporádica.

### 4.2 Topología de la red

Las configuraciones de redes en estrella constan de un nodo central (esto es, el foco de la agrupación) y, en torno a éste, de una agrupación de nodos externos que presentan mejores conectividades si aumenta la población de la agrupación. Además, la característica de conectividad se aproxima a la saturación en el caso de diseños que incluyen cuatro o más nodos muy separados entre sí. Por esta razón, el número de trayectos participantes y el grado de independencia con respecto a la propagación de los trayectos especificados es muy importante. Otra condición de la conectividad es que los trayectos participantes sean viables, ya que un trayecto nulo no puede contribuir a aquélla. Estos principios sugieren la siguiente estrategia para seleccionar los miembros de las agrupaciones: Por un lado, una asociación de trayectos con puntos de control muy distantes entre sí y, por otro lado, una asociación de trayectos situados en regímenes geofísicos diferentes, en donde los trayectos se utilicen con la máxima anchura de banda de propagación, incluyendo los trayectos más largos posibles en el sentido hacia el Ecuador y los trayectos que posean el ángulo de elevación máximo con respecto al sol. Por lo general, se comprueba que la región definida por grandes trayectos de círculo que conectan los nodos de la agrupación es la que define la zona más extensa posible que contiene el foco de la agrupación, lo que permite el mayor grado posible de diversidad en trayecto. No obstante, dado que es más probable que la viabilidad de los trayectos en el sentido hacia el polo sea limitada, debería insistirse en la especificación de circuitos en el sentido hacia el Ecuador con el mayor espaciamiento posible durante el día.

Una red total de carácter regional o mundial puede constar de un conjunto de subredes o agrupaciones en las que las propiedades ionosféricas de los focos de las agrupaciones y de otros nodos de cada agrupación siguen evolucionando. Por lo que se refiere a los servicios fijos, en los que el foco de la agrupación es estacionario, dicha evolución es el resultado de la variabilidad ionosférica. En el caso de los servicios móviles la situación es más complicada, ya que el foco de la agrupación puede estar en movimiento. Las frecuencias que una vez fueron óptimas no seguirán siendo las mejores durante mucho tiempo. Esto destaca la importancia de la gestión dinámica de los recursos de la red, incluido el intercambio de frecuencias entre los nodos de la agrupación. Se dispone de una abundante evidencia a propósito del exceso de capacidad de un determinado nodo a una zona de cobertura generalizada, por la presencia de la capa E esporádica. Aunque se reconoce que la capa E esporádica es un fenómeno diurno durante el verano para las latitudes medias, se ha visto que, debido a la zona auroral, se pueden utilizar las bandas de la capa E esporádica para soslayar las perturbaciones de propagación en la región F.

### 4.3 Influencia de la actividad magnética

Las tormentas magnéticas pueden influir de manera notable en la disponibilidad del espectro en ondas decamétricas, efecto éste que obedece a desviaciones importantes de la frecuencia máxima observada (MOF). Puesto que los efectos de las tormentas magnéticas pueden manifestarse en zonas de gran extensión y ser duraderos, resulta evidente que la información ionosférica en tiempo real sobre los enlaces requeridos constituirá una mejora decisiva en relación con los métodos de predicción a largo plazo que se utilizan algunas veces para definir las listas adaptables de exploración en ondas decamétricas. Las mayores reducciones de la anchura de banda disponible, resultado de las tormentas magnéticas, se producen para circuitos de latitudes medias.

Si bien las tormentas magnéticas dan lugar a variaciones evidentes de la MOF, también pueden detectarse fluctuaciones de esta MOF con niveles elevados de actividad magnética. Dichas fluctuaciones pueden guardar relación con un aumento del número y la magnitud de las perturbaciones ionosféricas itinerantes, que pueden originarse a proximidad de la zona auroral y propagarse en el sentido hacia el Ecuador. Aunque estas perturbaciones menos intensas no están lo suficientemente bien estructuradas como para generar una tormenta magnética, ocasionan varios efectos de propagación en ondas decamétricas, entre ellos, la multiplicidad de trayectos, la dispersión lateral y la capa F difusa. Estos efectos se observan directamente con sondeadores FMCW.

Además, es bien conocido que la actividad magnética está correlacionada con la posición geográfica y la intensidad de los fenómenos que se producen a latitudes elevadas, incluidos las depresiones de latitudes media y el óvalo auroral. Así, por ejemplo, el óvalo se ensancha y se mueve hacia el Ecuador a medida que la actividad magnética aumenta, y la magnitud de estos fenómenos se reduce cuando la actividad es menos intensa. Éste es un factor importante, ya que la actividad magnética puede alterar sustancialmente el régimen geofísico y, por tanto, el perfil de variabilidad para los circuitos fijos y móviles. La utilización de métodos de evaluación en tiempo real, tales como el sondeo mediante FMCW, constituye la manera más adecuada de evaluar, en el presente y en un futuro próximo, la calidad de funcionamiento de los circuitos en ondas decamétricas en la región de latitudes elevadas. La aplicación integral del procedimiento de evaluación y previsión podría hacer necesario mancomunar una constelación de sondeadores y datos seleccionados solares/terrestres disponibles a partir de programas informáticos y otras fuentes de datos en tiempo real de las que pueda disponerse. Este concepto presupone la existencia de una constelación de sondeadores suficientemente densa y que existe una infraestructura de distribución de los datos de canales obtenidos, incluida la información sobre gestión de frecuencias, a las redes en ondas decamétricas adaptables a las que se está prestando servicio.

En la Fig. 2a se ilustra el impacto de la actividad magnética en los circuitos objeto de comprobación técnica durante las pruebas experimentales antes descritas. Existe, al parecer, una diferencia clara entre condiciones de «tranquilo» y «perturbado», pero únicamente en el caso de redes en estrella en ondas decamétricas a latitudes elevadas.

### 4.4 Ventajas del sondeo en tiempo real con respecto a los métodos de predicción

Se han utilizado métodos de predicción para especificar y clarificar por orden de importancia listas de frecuencias destinadas a los sistemas en ondas decamétricas adaptables. Estos códigos se basan en el comportamiento mediano de los parámetros de propagación y existen diferencias entre las observaciones reales y las predicciones de los modelos. Esto explica la necesidad de actualizar los modelos. Entre los métodos aplicados para poner al día la información cabe citar la utilización de conjuntos de datos procedentes de sondeos verticales y oblicuos. Los llamados métodos de pseudoflujo se han utilizado con cierto éxito para obtener la información y existen técnicas en cuyo marco se emplearán diferentes conjuntos de datos obtenidos casi en tiempo real para mejorar la calidad de los modelos de comunicación.

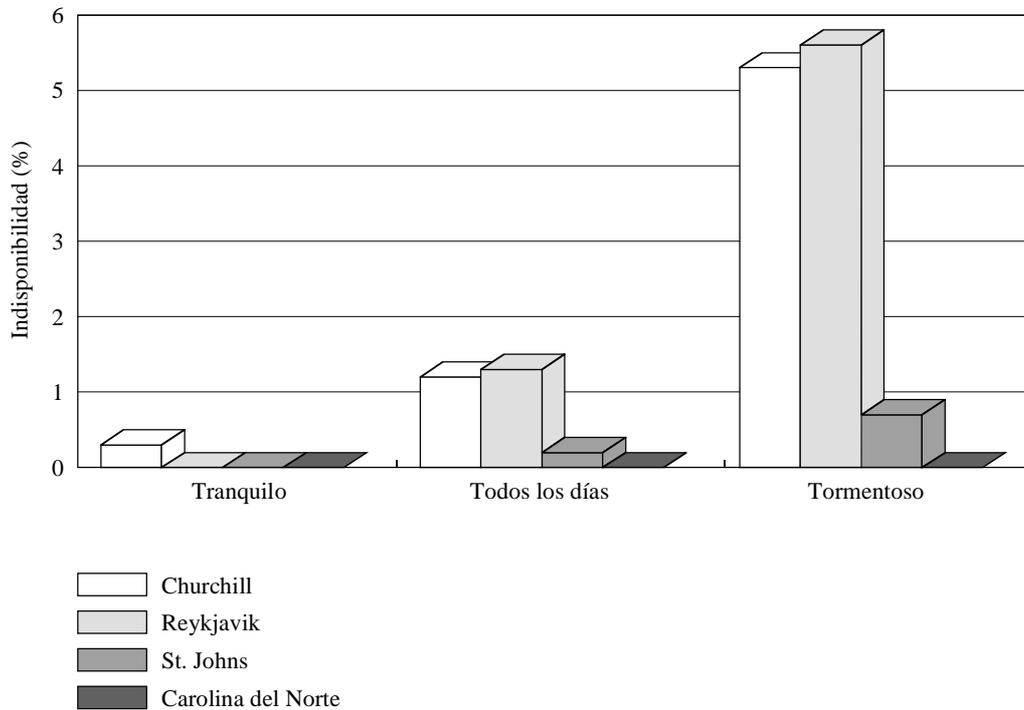
Los factores que más influyen en la eficacia de estos métodos son:

- el intervalo de tiempo entre la medición y la aplicación de los resultados,
- la proximidad de los resultados del modelo actualizado a la región de que se trate.

Este último factor depende de la densidad de las fuentes actualizadas, mientras que el primero está en función del tiempo de respuesta de la red tras recibir la información sobre gestión de frecuencias. Dada la variabilidad del entorno, las actualizaciones pierden utilidad rápidamente.

La Fig. 2b ilustra claramente las ventajas de la RTCE, incorporada en el esquema de sondeo mediante FMCW, con respecto a los métodos de predicción. El servicio simulado fue la comunicación de datos en ondas decamétricas y se especificó la relación señal/ruido,  $S/N$ , requerida para un grado de servicio aceptable. El ejemplo pone de manifiesto la eficacia de la predicción en comparación con la de la observación real en base a un sistema de sondeadores FMCW. Ambos sistemas de gestión de frecuencias tenían acceso a 11 bandas de frecuencias y se consideraba que la comunicación era satisfactoria si la relación  $S/N$  medida sobrepasaba un valor prefijado (determinado por el grado de servicio) para al menos una frecuencia. Se impuso al sistema de predicción el requisito de preseleccionar las tres «mejores» bandas de frecuencias de la lista básica de 11. Se supuso que el sistema RTCE constituía un avance con respecto al sistema de «predicción», si el sondeador FMCW identificaba una banda de frecuencias viable no incluida entre las tres seleccionadas por el sistema de predicción.

FIGURA 2a  
Impacto de la actividad magnética



Indisponibilidad de la comunicación (expresada en porcentaje) en función de las condiciones de actividad magnética para cuatro agrupaciones de redes en estrella durante el mes de abril de 1995, un mes con grandes variaciones del parámetro de actividad magnética,  $A_p$ . Los focos de las agrupaciones están situados en Churchill, Reykjavik, St. Johns, y Carolina del Norte, y cada agrupación consta de cuatro trayectos que terminan en el foco de la agrupación. En este cálculo de muestra, cada una de las redes en estrella tiene acceso a una frecuencia de cada una de las once bandas del servicio móvil aeronáutico y esas frecuencias son compartidas por los cuatro enlaces de cada agrupación. El periodo «tormentoso» va del 7 al 12 de abril, en el que:  $22 > A_p > 100$ . Durante el resto del periodo, el parámetro  $A_p$  fue inferior a ocho, y el periodo se calificó de «tranquilo».

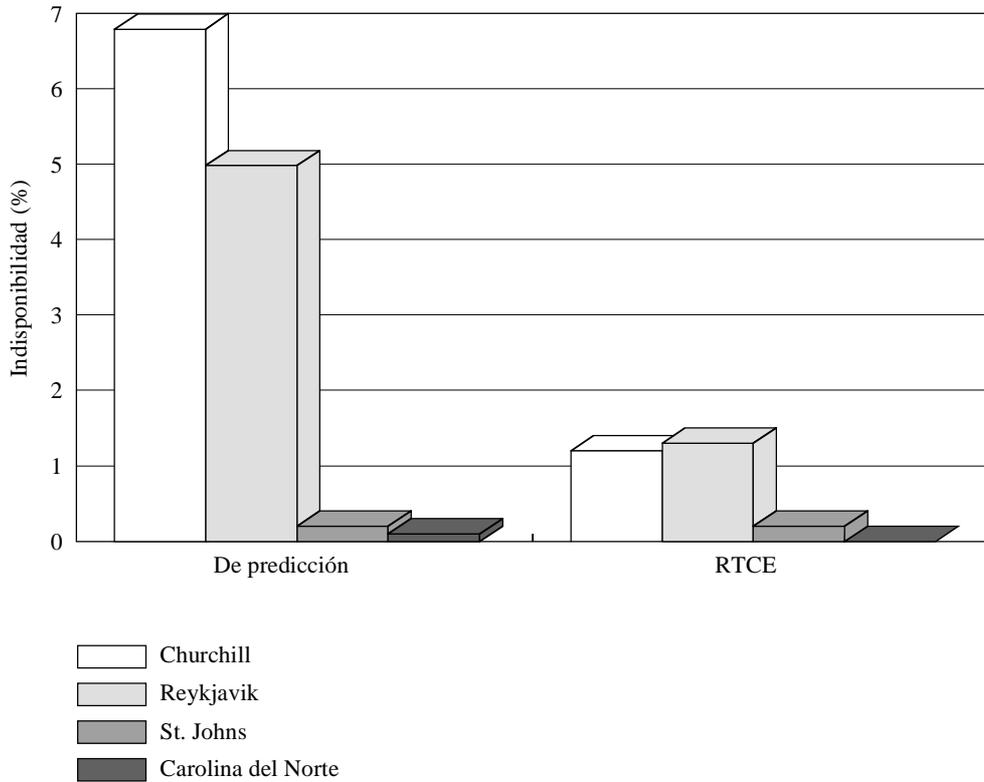
1337-02a

## 5 Determinación de la disponibilidad a largo plazo

Se han hecho evaluaciones de la disponibilidad consolidada de las redes para una velocidad de datos básica de 300 bit/s para los focos de agrupaciones indicados en la Fig. 1. La disponibilidad media de la red se determina en base al establecimiento de la conectividad de cualquiera de las 11 bandas de frecuencias preseleccionadas y de cualquiera de los enlaces participantes en la red, y se considera que se ha logrado la conectividad si se supera una prueba de la relación  $S/N$  prescrita.

Se observa que las disponibilidades compuestas son bastante elevadas y que la mayoría de las combinaciones de agrupaciones y meses sobrepasan el 99% con un margen considerable. Además, se vio que existe una enorme diferencia entre disponibilidades consolidadas dependiendo de la hora local y que el grueso de las interrupciones de las transmisiones tenía lugar entre el amanecer y el mediodía (determinado a partir del foco de la agrupación). Está claro que todo ello incidirá de manera significativa en la gestión de frecuencias del sistema definitivo de comunicación de datos en ondas decamétricas.

FIGURA 2b  
Esquemas «de predicción» y «RTCE»



Indisponibilidad según dos esquemas de gestión de frecuencias. El esquema denominado «de predicción» corresponde a una situación en la que se utiliza un programa de predicción establecido a fin de preseleccionar las tres frecuencias más probables, para su consideración. El segundo esquema, denominado «RTCE» (esto es, de evaluación de canales en tiempo real), corresponde a la mejor frecuencia obtenida mediante mediciones de sondeo en tiempo real.

1337-02b

## 6 Conclusiones

La calidad de funcionamiento óptima de una red en ondas decamétricas puede lograrse con un sistema de sondeo oblicuo que proporciona información con la que controlar dinámicamente los recursos de la red. Para ello, el método de sondeo «chirp», es decir, mediante FMCW es el más adecuado, ya que, según se ha visto, es relativamente poco intrusivo y no causa interferencia perjudicial a los usuarios. Aunque la compartición y la reatribución dinámica de frecuencias es una condición esencial para controlar los recursos de las redes, también es necesario disponer de una serie completa de frecuencias en todas las bandas admisibles para aprovechar plenamente la capacidad de previsión dinámica. Las redes en ondas decamétricas adaptables pueden tener dimensiones mundiales y es posible lograr considerables mejoras de la calidad de funcionamiento si la aplicación de tecnologías de diversidad en trayecto y reutilización de frecuencias no da lugar a interferencias perjudiciales. Una red mundial de sondeadores no intrusivos podría ser el agente que permitiera formular un pronunciamiento sobre estas posibles eficacias. Convendría realizar más estudios sobre este tema. Hay que señalar además que la información utilizada para llegar a esas conclusiones se obtuvo durante un periodo de baja actividad solar, en el que sólo hubo unos cuantos episodios de subtormentas magnéticas más intensas que lo normal. Es preciso disponer de información y datos similares para niveles máximos de actividad solar.