

CALCULO Y PREDICCION DE LAS DOSIS AL EXTERIOR EN CONDICIONES REALES DE ACCIDENTE

Emilio DEL CAMPO ORTEGA

INTRODUCCION

Desde hace bastantes años, las administraciones competentes de casi todos los países con centrales nucleares en funcionamiento vienen exigiendo a las compañías propietarias de las mismas el disponer de planes de emergencia en caso de condiciones anómalas de operación.

El objetivo fundamental de dichos planes es el de atenuar el impacto radiológico a la población vecina en caso de un escape accidental de productos radiactivos. Estas exigencias son especialmente patentes en el caso de la NRC en los Estados Unidos, que ha publicado numerosas guías sobre el tema.

Los planes de emergencia en sí no constituyen una novedad, disponiendo, tanto las centrales como los organismos reguladores, de metodologías conservadoras para el análisis del impacto radiológico en operación anómala. La novedad consiste en tener disponible un sistema de cálculo de dosis con meteorología y descargas reales que permita conocer la evolución tanto de las descargas radiactivas como de las concentraciones de productos radiactivos en los alrededores del emplazamiento. Es interesante que dicho sistema disponga de salida gráfica mediante pantalla en color, lo que sin duda proporciona una ayuda considerable por la facilidad que representa la interpretación de resultados en momentos en que la natural agitación producida tras el accidente puede dificultar la interpretación exacta de complejos listados de ordenador.

La representación gráfica por pantalla de los resultados presenta, además, la ventaja adicional de que no sólo los expertos en Protección Radiológica, sino los directivos de la compañía propietaria y las autoridades nacionales, provinciales y locales puedan conocer de inmediato cuál es la evolución temporal del penacho producido por las descargas radiactivas. Dicho conocimiento permitirá tomar las medidas adecuadas para proteger al público de las consecuencias radiológicas del accidente.

Una estimación realista de dosis en caso de accidente debe estar basada en datos meteorológicos reales, tales como dirección y velocidad del viento y clase de estabilidad, así como en la actividad realmente descargada de cada isótopo significativo. Se podrán así evaluar la dirección en que viajan los materiales descargados, su dispersión y la dosis que recibirá la población por varios conceptos. Esta estimación permitirá

conocer los lugares donde hay que enviar equipos móviles de detección, confirmando la necesidad de recomendación de las medidas de protección más adecuadas, tales como refugio o evacuación. Sin esta información se corre el riesgo de declarar medidas de emergencia conservadoras en zonas no afectadas por las descargas.

Una vez más la NRC ha sido pionera en suministrar las guías necesarias para la preparación y realización de planes de emergencia. El Nureg-0654 tiene como propósito fundamental establecer unos criterios para el desarrollo y la preparación de los planes de emergencia de las centrales nucleares. Adicionalmente intenta servir de guía a las autoridades responsables para una adecuada respuesta a la emergencia.

El Nureg-0654 establece para Estados Unidos dos zonas de planificación de emergencia. La primera comprende un radio de 10 millas alrededor de la planta; la segunda se extiende hasta un radio de 50 millas. Se exige que la compañía propietaria tenga la capacidad de hacer estimaciones de dosis y predicciones en la zona de 10 millas en un plazo de quince minutos después de haberse producido el accidente. Después de estos quince minutos deben estar disponibles las estimaciones y predicciones a lo largo de todo el accidente. No obstante lo indicado en el Nureg-0654 parece suficiente considerar un radio de únicamente 10 km. para las acciones a corto plazo.

A la vista de todo lo anterior se comprende que no se debe esperar a que se produzca un accidente para empezar a pensar cuáles son los datos meteorológicos más fiables y cuál el modelo de dispersión adecuado. Se debe tener a punto un sistema automatizado de toma de datos, transmisión, cálculo y presentación gráfica de resultados. Este artículo analiza los distintos aspectos del modelo global y finalmente describe lo que podría ser un sistema automático de cálculo y predicción de dosis con meteorología y descargas reales.

DESCARGAS RADIATIVAS

La determinación de la tasa de descarga de radionúclidos al exterior es una parte fundamental del cálculo de dosis a la que, sin embargo, no se presta a veces la debida atención. Sin una correcta estimación de las actividades liberadas, los más sofisticados modelos de dispersión atmosférica producirán resultados



Emilio del CAMPO ORTEGA es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1970). Ingresó en Empresarios Agrupados en 1973, integrándose en el Departamento Civil. En 1977 pasó a ocupar la jefatura de la Sección de Protección Radiológica, puesto que continúa desempeñando en la actualidad. Ha realizado numerosos trabajos para las centrales de Almaraz, Cofrentes, Valdecaballeros, Trillo, José Cabrera y Angra (Brasil).

no acordes con la realidad. Pero la determinación de las descargas es un problema difícil. No es realista utilizar el término fuente del TID-14844 (100 % de gases nobles y 50 % de yodos), aunque éste puede estar incluido como una librería del programa para su uso cuando no estén disponibles los monitores de descargas o cuando se requiera un análisis ultraconservador.

Un primer método relativamente simple para evaluar las descargas utiliza los datos de los monitores de efluentes gaseosos para la determinación de los gases nobles liberados. Mediante las apropiadas librerías que contengan datos sobre las relaciones entre gases nobles, yodos y partículas se puede disponer de un término fuente para ser usado en los cálculos. Pero es sobradamente conocido que dichas relaciones no son fijas en absoluto y que varían ampliamente en función del diseño específico de la planta, del tipo de accidente y de la evolución del mismo. El uso de este método limita, pues, la eficacia del programa en la estimación de descargas reales.

Las guías reguladoras 1.21 y 1.97 y el Nureg-0737 establecen las bases para vigilar las emisiones radiactivas durante condiciones normales y postaccidente. El monitor de radiación de efluentes gaseosos toma muestras continuamente para determinar las concentraciones ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) de partículas, yodos y gases nobles descargados. Conociendo el caudal de descarga se puede tener la tasa de descarga ($\mu\text{Ci}/\text{s}$) de cada radionúclido. Los yodos y las partículas se retienen en cartuchos que periódicamente se extraen y se envían al laboratorio para análisis. Para cada cálculo de dosis se usan los análisis de laboratorio más recientes para calcular las actividades descargadas de cada radionúclido. Se consiguen mejores resultados empleando tres detectores de germanio para realizar análisis isotópicos *on-line* de gases nobles, yodos y partículas. Este último método es mucho más costoso, aunque es el que mejor responde al concepto de escenario realista.

Un caso especial lo constituyen los escapes no controlados de la contención cuando no existe una contención secundaria. El método más fácil y fiable para determinar la actividad descargada se basa en los monitores de gases nobles, yodos y partículas de la atmósfera de contención y en la estimación del caudal escapado a partir del indicador de presión en la contención mediante la apropiada correlación entre presión y caudal fugado establecida en la última prueba a presión de la contención.

METEOROLOGIA

Si la correcta estimación de las descargas radiactivas al exterior es de suma importancia para la estimación de las consecuencias radiológicas en caso de accidente, no lo es menos el conocimiento, tan exacto como sea posible, de las condiciones meteorológicas imperantes. Este conocimiento indicará qué sectores son los más afectados, cuánto tiempo tardará en llegar el penacho, qué concentración habrá, qué dosis se producirán, etc.

El apéndice E del 10 CFR 50 indica los equipos necesarios para determinar el impacto de las descargas radiactivas al medio ambiente. Para cumplirlo se deben tener disponibles medidas meteorológicas de un sistema meteorológico primario y, a ser posible, de otro de respaldo. Este último suministrará datos cuando el primero esté fuera de servicio y asegurará que la información meteorológica básica está disponible inmediatamente después de una descarga accidental de productos radiactivos.

El sistema meteorológico primario deberá producir y registrar datos meteorológicos locales y cumplir con los requisitos de la guía reguladora 1.23. Esta guía identifica también los datos meteorológicos que deben estar disponibles para el cálculo del transporte y difusión.

Además de producir los datos, el sistema meteorológico ha de tener la posibilidad de ser interrogado a distancia o, lo que es lo mismo, de transmitir continuamente los datos al centro de dirección de la emergencia o al centro de soporte técnico, donde serán debidamente utilizados bien por introducción automática en el ordenador, bien manualmente.

Para cálculos teóricos previos y obtención de resultados a incluir en los estudios de seguridad, se acepta generalmente un modelo de difusión gaussiano en línea recta basado en el modelo de la guía reguladora 1.145. Aunque dicho modelo es bastante sofisticado en cuanto al uso de 16 direcciones de viento, descarga por chimenea o a ras de suelo, corrección de la dispersión por los edificios circundantes, corrección por el efecto meandro, etc., y se apoya en los datos meteorológicos históricamente registrados en el emplazamiento, no se considera adecuado para el cálculo de dosis en condiciones reales por no tener los datos meteorológicos coincidentes con la descarga ni la variación de los mismos con el tiempo.

Incluso en los emplazamientos más sencillos desde el punto de vista meteorológico, aquellos en que se pueda su-

poner que en un cierto instante el régimen de vientos es uniforme en un radio de 10 km., no es adecuado suponer la persistencia en el tiempo de las condiciones meteorológicas. Estas pueden cambiar no sólo del día a la noche sino incluso en intervalos relativamente cortos. Este tipo de emplazamientos corresponde generalmente a llanuras tierra adentro, sin existencia de montañas pronunciadas o valles muy marcados. Si del examen del emplazamiento y de los datos históricos registrados en el mismo se llega a la conclusión de la uniformidad en todo él, es aceptable el uso de una única torre meteorológica, cuyos datos se extrapolan espacialmente en el radio considerado de 10 km. Se debe considerar, eso sí, variación, temporal, como se indica más adelante.

Pero por necesidades de refrigeración y evacuación de calor, la mayoría de las centrales nucleares están situadas junto a grandes masas de agua: en la costa, junto a grandes lagos o próximas a ríos con valles pronunciados. En estos casos, la meteorología es mucho más compleja, dando lugar a alguno de los siguientes efectos:

- Concentraciones durante la noche de productos radiactivos sobre las masas de agua y transporte durante el día al terreno.
- Transporte predominante a lo largo del valle, no importa la configuración más o menos sinuosa del mismo.
- Complejos mecanismos de transporte en situaciones costeras dando lugar a caminos mar-tierra y viceversa, produciendo recirculaciones e impidiendo una dispersión normal.

En estos emplazamientos complejos resulta casi obligado establecer un modelo que, además de la variación temporal, tenga en cuenta la variación espacial del régimen de vientos. En este caso ya no basta con una sola torre meteorológica, sino que se deben colocar pequeñas torres adicionales con sensores meteorológicos a 10 m. de altura, el conjunto de los cuales suministrará información sobre las condiciones meteorológicas en todo el emplazamiento en un instante dado. La necesidad o no de la implantación de estos sensores adicionales, así como su número y ubicación, dependerá del examen de los datos meteorológicos históricos y del estudio previo del emplazamiento.

Cuando se considere variación espacial del viento se debe establecer una malla con tamaño de cuadrícula de 2 a 6 km. A cada cuadrado de la malla se asocia un vector cuyo módulo indica la

velocidad del viento y cuya dirección representa la del viento. La velocidad y dirección se obtienen para cada cuadrado elemental por interpolación de los datos procedentes de la torre principal y de los sensores adicionales. Se obtienen resultados satisfactorios en la interpolación ponderando en razón al inverso del cuadrado de las distancias.

Para considerar la variación temporal, los datos meteorológicos se toman cada segundo y se promedian los 900 valores correspondientes a quince minutos. Se tiene así un mapa de vientos cada quince minutos que representa las condiciones meteorológicas reales para el cálculo de la dispersión.

Los principales parámetros que se deben medir son:

- Dirección del viento, que determina en qué sector se pueden presentar problemas de exposición, permitiendo concentrar los esfuerzos en el mismo.
- Velocidad del viento, que aparte de intervenir en la difusión, indica cuánto tardará la descarga en alcanzar un punto determinado.
- Desviación *standard* de la dirección del viento.
- Gradiente vertical de temperaturas, que junto con la desviación *standard* permite deducir la clase de estabilidad atmosférica, la cual es de suma importancia para el cálculo de concentraciones. A igualdad de los demás factores, las concentraciones pueden variar varios órdenes de magnitud en función de la clase de estabilidad.

La transmisión de los datos meteorológicos al ordenador que controla el sistema y realiza los cálculos ha de ser automática y continua de tal forma que en el momento de producirse un accidente estén disponibles para ser usados inmediatamente.

DIFUSION Y CALCULO DE DOSIS

El Nureg-0654 establece que en el radio de 15 km. de la central al que se re-

fiera el modelo clase A, se deben tener estimaciones del impacto radiológico a los quince minutos de haberse detectado un accidente. Se pueden usar datos meteorológicos promedios de quince minutos y calcular las concentraciones (X/Q) basadas en la estabilidad atmosférica. La salida de resultados debe incluir las dimensiones y posición del penacho y la magnitud y tiempo de llegada de la concentración máxima a poblaciones y otros lugares de interés.

Consistente con el promedio de datos meteorológicos para quince minutos es la descomposición de la descarga en una serie de descargas sucesivas tipo «puff». A cada «puff» se le aplicarán los datos meteorológicos correspondientes al instante en que se ha liberado.

Se calcula en primer lugar la trayectoria de cada «puff» que, en general, será curval salvo si las condiciones meteorológicas son persistentes en el tiempo. Dicha trayectoria curva representa la del centro del penacho y se puede considerar formada por tramos rectos, siendo cada tramo el camino que ha viajado el «puff» en cada intervalo de quince minutos. Pero a la vez que viaja, el «puff» se difunde en función de la velocidad y clase de estabilidad del viento, por lo que en intervalos sucesivos afectará a un área mayor con una concentración menor. La concentración relativa (X/Q) para un cierto instante de tiempo después de haber sido liberado un «puff» puede calcularse mediante la conocida expresión:

$$\left(\frac{X}{Q} \right) = \frac{(2\pi)^{-3/2}}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ - \left[\frac{(x - ut)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\}$$

Una vez realizados los cálculos relativos a todos los «puff» liberados con intervalos de quince minutos, se superponen para un mismo instante los resultados de todos ellos y la suma será una imagen de las concentraciones en el

emplazamiento en ese instante. Empleando los correspondientes factores y modelos de cálculo para dosis al cuerpo y al tiroides se calculan éstas, como se indica más adelante.

Las descargas a ras de suelo o que pueden considerarse como tales deben estar afectadas por un factor de dilución inicial debido al efecto de los edificios. En este caso, la dosis gamma al cuerpo se calcula por inmersión en una nube semiinfinita y la dosis al tiroides suponiendo las tasas de respiración habituales.

Para descargas por chimenea se ha de calcular en primer lugar la altura efectiva de la descarga sumando a la altura real de la chimenea al correspondiente Δh , función de la velocidad del viento, velocidad de salida, etc. A partir de ella y de los factores de empobrecimiento de la nube y de deposición se puede calcular la huella en el suelo, que representa las concentraciones a nivel del terreno que se usan para el cálculo de dosis.

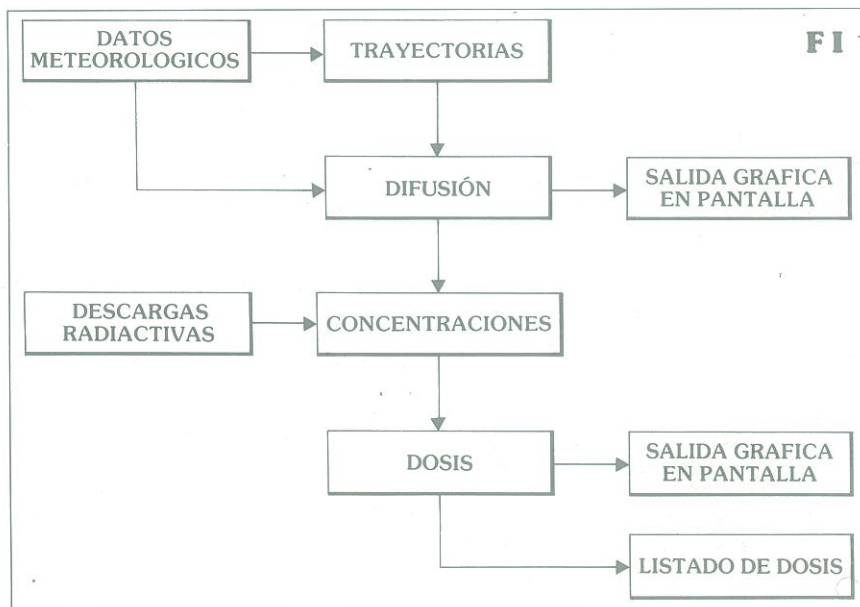
En la figura 1 se ilustra gráficamente el modelo de recogida de datos y secuencia de cálculos hasta ahora descrito.

La decisión de evacuar o no a la población de ciertos sectores dependerá de la localización y magnitud estimadas para el penacho. Trabajando en condiciones reales y hasta distancias de 10-15 km. en terreno llano, probablemente el penacho se encuentre en el sector de 22,5° predicho o en uno de los dos adyacentes. Sin embargo, las predicciones son menos ciertas cuanto mayor es su plazo y puede ocurrir que la llegada de un frente frío cambie radicalmente la dirección del viento en cuestión de minutos.

PRESENTACION DE RESULTADOS

El sistema de cálculo de dosis en condiciones reales tiene un doble objetivo: suministrar datos de forma rápida y sencilla para ayudar en la toma de decisiones en caso de emergencia y registrarlos de forma que puedan ser analizados *a posteriori* para poder evaluar el impacto radiológico producido. Para conseguir estos objetivos es muy útil disponer de una salida por pantalla, de una copia gráfica en papel y de un listado de los parámetros usados y de los resultados obtenidos.

La salida gráfica por pantalla en color es el mejor método para representar cualitativamente, de forma rápida y eficaz, toda la información. Se ha de disponer, al menos, de una pantalla, aunque pueden existir pantallas adicionales en centros distintos. En la pantalla debe visualizarse el emplazamiento en un radio de 10 km., con indicación de los centros de población, ríos, vías de comunicación y otros lugares que se consideren de interés. Es útil también representar círculos concéntricos que marquen las distancias al punto de descarga



y líneas que partiendo de dicho punto dividan el emplazamiento en 16 sectores de 22,5°. Sobre todo en este entramado se representa la posición instantánea o integrada de la nube, lo que inmediatamente indica en qué sectores se deben concentrar los esfuerzos de emergencia. El que la representación sea en color y de alta resolución, lo que por otra parte no es problema dado el actual desarrollo informático, facilita indudablemente la visualización.

La misma salida que por pantalla puede tenerse también mediante copia gráfica en colores sobre papel. Se conservará así un registro histórico de lo sucedido durante el accidente, lo que será de indudable valor para una posterior evaluación del impacto radiológico del mismo.

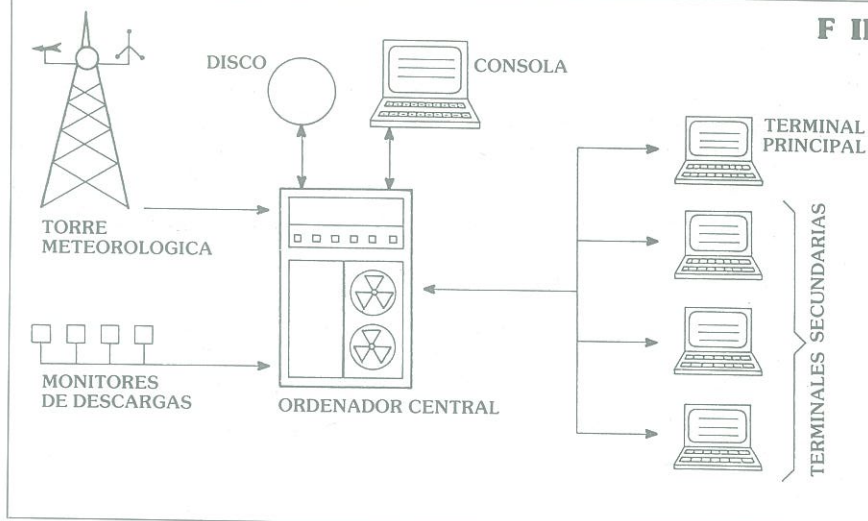
Es muy útil también disponer de un listado que recoja las lecturas de los monitores de descargas, los datos recibidos de las torres meteorológicas y las tasas de dosis y dosis integradas calculadas para cada sector y distancia y para cada punto considerado de interés. Este listado a la vez que, junto con la salida gráfica por pantalla, sirve de base para la toma rápida de decisiones, puede también ser utilizado en una posterior evaluación de impacto radiológico.

MONITORES DE RADIACION EXTERIORES

En toda central nuclear existen una serie de monitores de radiación que normalmente forman un anillo alrededor de la misma y están situados a distintas distancias de ella. Los registros de estos monitores deben ser usados para contrastar los resultados del modelo de cálculo descrito en los apartados anteriores y deben servir de apoyo para las decisiones de los responsables de la emergencia.

Es difícil establecer un criterio sobre si se debe dar mayor credibilidad a las dosis calculadas o a las medidas por los monitores. En las primeras puede haber errores debidos a la no excesiva rigurosidad de los datos meteorológicos y de descargas utilizados. Pero, también, las segundas pueden acusar errores, sobre todo en el caso de que el anillo de monitores no sea muy compacto y que las condiciones meteorológicas reinantes favorezcan el transporte del penacho con poca difusión lateral. En este caso, los productos radiactivos liberados podrían pasar entre dos monitores sin que éstos lo acusaran. Por ello no es práctico efectuar retroalimentaciones y correcciones al modelo de cálculo en función de las dosis registradas por los monitores fijos.

Adicionalmente es conveniente disponer de monitores móviles que puedan enviarse a registrar dosis a aquellos sectores en los que, como resultado de los cálculos y la visualización en pantalla, se supone que se van a producir las concentraciones y dosis más elevadas.



DESCRIPCION DE UN PROTOTIPO

A continuación se describe un sistema basado en un ordenador central que puede efectuar cálculos de dosis y asegurar la comunicación de datos en una central nuclear en condiciones de emergencia. Para asegurar el funcionamiento incluso en caso de fallo del ordenador central, conviene que, al menos una de las pantallas terminales, sea un microordenador que pueda funcionar autónomamente.

La figura 2 muestra la configuración de un sistema básico. El ordenador central puede tener aproximadamente 512 Kbytes y estar auxiliado por un disco de 6-120 Mbytes para almacenamiento de datos. Las terminales gráficas pueden ser microordenadores de aproximadamente 64-128 Kbytes en el caso de que se requiera su posible funcionamiento independiente. El sistema completo puede contemplarse como un conjunto de tres subsistemas: entrada de datos, ordenador central y terminales.

El subsistema de entrada de datos consta de torre meteorológica, sensores meteorológicos adicionales, monitores de descarga, monitores fijos, monitores móviles, etc.

El subsistema del ordenador central consta del propio ordenador, consola, impresora y disco de almacenamiento. Este ordenador recibe los datos del subsistema de entrada y realiza los cálculos de promedios meteorológicos, transporte, difusión y dosis. Los resultados se transmiten a las estaciones terminales para su presentación en forma gráfica o de listados.

El subsistema terminal consta de una o varias estaciones terminales actuando en este último caso una de ellas de terminal principal. Cada estación terminal recibe datos del ordenador central y el usuario puede pedirle la información deseada. Los resultados no están disponibles en las terminales secundarias hasta que desde la principal no se autoriza, una vez comprobada la consistencia de los mismos. La terminal principal puede estar ubicada en el Centro de Soporte

Técnico o en el Centro de Dirección de la Emergencia y las secundarias en la Sala de Control, oficinas de la compañía propietaria, etc.

CONCLUSIONES

Un sistema de cálculo de dosis en tiempo real como el descrito parece sin duda una poderosa herramienta con la que conviene contar como ayuda en la toma de decisiones sobre refugio o evaluación en caso de accidente de una central nuclear.

El diseño del sistema requiere un conocimiento y estudio previo de las características particulares del emplazamiento: meteorología, topografía, demografía, etc. En función de todos estos parámetros se tomará la decisión sobre la implantación de un sistema más o menos costoso y complicado.

El equipo informático dedicado al cálculo de dosis en condiciones reales debe emplearse únicamente en esta tarea. Si, adicionalmente, se usa para otros menesteres, éstos se considerarán como tareas secundarias, asegurando que estará siempre disponible para el cálculo de dosis en caso de emergencia.

Además de cumplir el requisito establecido por el Nureg-0654 de que los resultados del modelo clase A estén disponibles a los quince minutos de declarado el accidente, parece deseable disponer de una estimación previa, en el menor tiempo posible (tal vez cuatro o cinco minutos), de las condiciones de difusión imperantes. El diseño del sistema debe tener en cuenta esta posibilidad.

El sistema debe tener capacidad de predicción. Dicha predicción puede estar basada en condiciones meteorológicas persistentes o en las especificadas por el ordenador. Se consideran, en principio, fiables las predicciones hasta dos horas, pudiendo producirse errores considerables si se predice a más largo plazo. De todas formas, la mayor o menor fiabilidad de las predicciones a más de dos horas dependerá de las características meteorológicas del emplazamiento.