

SISTEMAS DE CONTROL SUPLEMENTARIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

JOSÉ LUIS BERMÚDEZ CELA* / BELÉN M. FERNÁNDEZ DE CASTRO**

JOSÉ A. SOUTO GONZÁLEZ***

*Sección de Medio Ambiente

UPT As Pontes-Endesa Generación S.A.

**Departamento de Estadística e Investigación Operativa

Facultad de Matemáticas

Universidad de Santiago de Compostela

***Departamento de Ingeniería Química

Facultad de Química

Universidad de Santiago de Compostela

Recibido: 29 octubre 2002

Aceptado: 25 noviembre 2002

Resumen: Los sistemas de control suplementario de la contaminación atmosférica, basados en efectuar cambios en las condiciones de operación para reducir las emisiones atmosféricas en condiciones meteorológicas adversas, permiten evitar la aparición de episodios significativos de alteración de la calidad del aire. Para que estos sistemas sean eficaces se necesita disponer de herramientas de predicción concebidas como elementos de apoyo a la toma de decisiones para la operación de las instalaciones.

La central térmica As Pontes-Endesa ha implantado dos sistemas de predicción, desarrollados mediante proyectos de investigación en colaboración con la Universidad de Santiago de Compostela. Por un lado, el Sistema de Predicción Estadística de Inmisión (SIPEI), que realiza predicciones a muy corto plazo (media y una hora) utilizando modelos orientados al receptor a partir de los datos de la red de vigilancia y que ha sido desarrollado por el Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Por otro lado, el Sistema de Apoyo para la Gestión de la Calidad del Aire (SAGA), que realiza predicciones a medio plazo (24 horas) utilizando un modelo de difusión atmosférica a partir de datos de predicción meteorológica y de emisiones y que ha sido desarrollado por los Departamentos de Ingeniería Química y de Física de la Materia Condensada.

Actualmente, continúan las actividades de optimización y de adaptación de los sistemas a las nuevas directivas de calidad del aire, disponiendo de cofinanciación de la Xunta de Galicia.

Palabras clave: Calidad del aire / Sistemas de control suplementario / Predicción estadística / Modelos de difusión atmosférica.

ATMOSPHERIC POLLUTION SUPPLEMENTARY CONTROL SYSTEM

Abstract: Atmospheric Pollution Supplementary Control Systems work changing conditions of operation to reduce atmospheric emissions in unfavourable meteorological conditions and avoid quality air level episodes. Prediction tools are necessary to make these systems effective. These prediction tools have to be designed as help elements in decision making.

The As Pontes-Endesa power plant has two different prediction systems developed during investigation projects in cooperation with the University of Santiago de Compostela. On the one hand, an Statistic Prediction System (SIPEI) gives forecasts with short horizon (half an hour and an hour). It uses models directed to the receptor with data from Vigilance Network. It has been developed by the Department of Statistics and Operation Research. On the other hand, an Air Quality Management Assessment System gives forecasts with middle horizon (24 hours). It uses an atmospheric diffusion model with data from meteorological predictions and emissions. It has been developed by the Department of Chemistry Engineering and the Department of Condensed Matter Physics.

Keywords: Air quality / Supplementary control system / Statistical prediction / Atmospheric diffusion models.

1. INTRODUCCIÓN

La degradación del medio natural es uno de los problemas más urgentes del mundo actual, que se ha intensificado en las últimas décadas por el acelerado crecimiento de la población humana y por el consumo incontrolado de los recursos naturales.

En gran parte esta degradación se asocia a lo que conocemos como contaminación atmosférica, es decir, la incorporación a la atmósfera de sustancias o de formas de energía que producen cambios no deseados en sus características físicas, químicas o biológicas y que pueden afectar negativamente a los seres vivos o a los bienes materiales en contacto con ellos.

Existen dos posibles enfoques en las estrategias de lucha contra la contaminación atmosférica:

- La fijación de normas de calidad de aire que no puedan excederse.
- El control de las emisiones mediante el empleo de la mejor tecnología disponible.

Si la estrategia se centrara solamente en el mantenimiento de una calidad de aire admisible, podrían originarse discriminaciones entre las distintas actividades que se van instalando en una zona. Por el contrario, si la estrategia solamente se centrara en el control de las emisiones, podrían originarse situaciones episódicas que afectarían seriamente a la calidad del aire debido a la influencia de factores como la densidad de fuentes emisoras, las condiciones meteorológicas y la topografía de la zona.

La estrategia óptima será, por lo tanto, una combinación de los enfoques anteriores:

- Control de los nuevos focos de emisión basado en las mejores tecnologías disponibles.
- Control de las emisiones de los focos existentes y adaptación progresiva a las exigencias de los nuevos.
- Vigilancia y control de la calidad del aire, con el fin de mantener unos niveles de contaminación que no produzcan efectos adversos sobre la salud humana y sobre los ecosistemas.

Esta estrategia está siendo utilizada en la Unión Europea, que ha incorporado en los últimos años tres figuras legislativas claves para el control de la contaminación atmosférica en Europa:

- La directiva 1996/61/CE relativa a la prevención y control integrado de la contaminación (IPPC).
- La directiva 1996/62/CE sobre evaluación y gestión del aire ambiente.
- La directiva 2001/81/CE sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos.

En este marco combinado de actuaciones enfocadas a la reducción de las emisiones atmosféricas y al control de la calidad del aire a nivel del suelo se inscriben los denominados sistemas de control suplementario de la contaminación atmosférica, de los que describimos a continuación su fundamento y su utilización práctica en la central térmica As Pontes.

2. TÉCNICAS DE PREDICCIÓN DE INMISIÓN

La aplicación de sistemas de control suplementario de la contaminación atmosférica en instalaciones industriales se basa en efectuar cambios en las condiciones de operación que supongan una reducción de las emisiones, cuando existan condiciones meteorológicas adversas que podrían originar episodios significativos de alteración de la calidad del aire.

Para que estos sistemas sean eficaces se necesita:

- Información en tiempo real de emisiones, de calidad del aire y de meteorología.
- Posibilidad técnica de reducción de las emisiones mediante modificaciones en el proceso.
- Implantación de técnicas de predicción de la calidad del aire.

Las técnicas de predicción, concebidas como herramientas de apoyo a la toma de decisiones en la operación de las instalaciones, pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Modelos orientados al receptor: estos modelos tratan de reconstruir la contribución de cada foco emisor a cada foco receptor considerado, sin tener en cuenta generalmente los patrones de dispersión que siguen los contaminantes. Por lo tanto, estos modelos utilizan medidas de las concentraciones de contaminantes en el aire ambiente obtenidas en tiempo real, complementadas generalmente con datos meteorológicos para aprender de ellas, buscando la aportación a estas medidas que se ha producido desde diferentes focos emisores. Este tipo de modelos se utiliza para realizar predicciones a muy corto plazo.
- Modelos orientados al emisor: estos modelos, cuya representación más importante son los modelos de difusión atmosférica, tratan de definir la distribución de una sustancia extraña que se emite a la atmósfera, basándose en la representación matemática de los diferentes fenómenos de transporte y transformación que puede experimentar esta sustancia. Este tipo de modelos necesitan datos de predicción meteorológica y de emisiones y se utilizan para realizar predicciones a medio plazo.

3. CONTROL SUPLEMENTARIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA CENTRAL TÉRMINA DE AS PONTES

El control de la calidad del aire en los alrededores de las centrales térmicas se efectúa habitualmente por medio de la instalación de redes de medida de los niveles de inmisión, uno de cuyos objetivos fundamentales es alertar de episodios puntuales de contaminación que pueden aparecer bajo condiciones meteorológicas específicas.

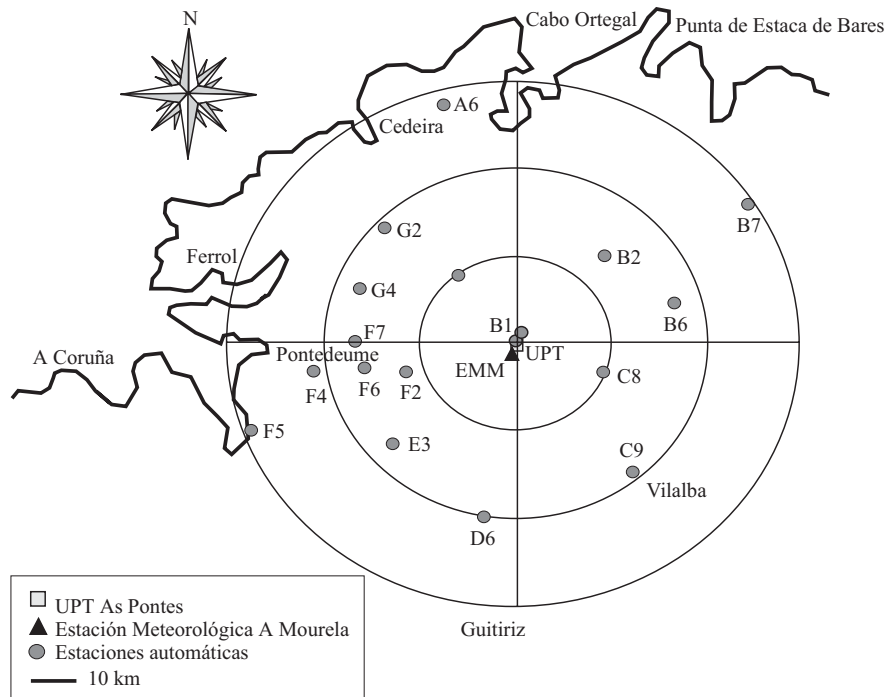
En el caso de la central térmica de As Pontes se dispone de un sistema de seguimiento y control de la calidad atmosférica formado por los siguientes elementos:

- Sistema de control de emisiones: dotado de mediciones en continuo de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas, oxígeno, temperatura y caudal para cada uno de los grupos que constituyen la central térmica.
- Red de vigilancia de la calidad del aire: formada por 17 estaciones automáticas con monitores de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas en suspensión, distribuidas alrededor de la central térmica y comunicadas con ésta a través de la radio. Adicionalmente, algunas estaciones disponen de medidas de ozono y variables meteorológicas.
- Estación meteorológica: dotada de un mástil de 80 m de altura con medidas de temperatura, velocidad y dirección de viento a distintos niveles, así como sensores de humedad relativa, precipitación, radiación solar y presión atmosférica a nivel del suelo.
- Unidad central de adquisición de datos y gestión de la información: recibe y gestiona toda la información ambiental, disponiendo de periféricos en las salas de control. El Laboratorio de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia tiene acceso en tiempo real, mediante comunicación telefónica, a la base de datos bruta de la red de vigilancia.

A partir de la información existente, la central térmica ha implantado un sistema de control suplementario de la contaminación atmosférica, de modo que en presencia de condiciones meteorológicas adversas al proceso de difusión del penacho emitido y/o a la aparición de episodios de alteración de la calidad del aire, realiza dos tipos de actuaciones encaminadas a reducir sus emisiones atmosféricas:

- Modificación de las mezclas de carbones de consumo, con el fin de utilizar hasta un 100% de carbón de importación, caracterizado por sus bajos contenidos en azufre y cenizas.
- Disminuciones de la producción eléctrica de los grupos generadores.

Puesto que este tipo de episodios se caracterizan por cambios bruscos y pronunciados en las concentraciones ambientales medidas es indispensable disponer de sistemas de predicción de inmisión como elemento de ayuda a la toma de decisiones en la operación de la instalación.

Figura 1.- Red de vigilancia de la calidad del aire

Para ello se han desarrollado dos líneas de trabajo diferenciadas, en ambos casos en colaboración con la Universidad de Santiago, mediante proyectos de investigación que disponen de cofinanciación externa:

- Sistema de Predicción Estadística de Inmisión (SIPEI): realiza predicciones a muy corto plazo (media y una hora) utilizando modelos orientados al receptor basados en los datos que suministra la red de vigilancia.
- Sistema de Apoyo para la Gestión de la Calidad del Aire (SAGA): realiza predicciones a medio plazo (veinticuatro horas) utilizando un modelo de difusión atmosférica a partir de datos de predicción meteorológica y de emisiones.

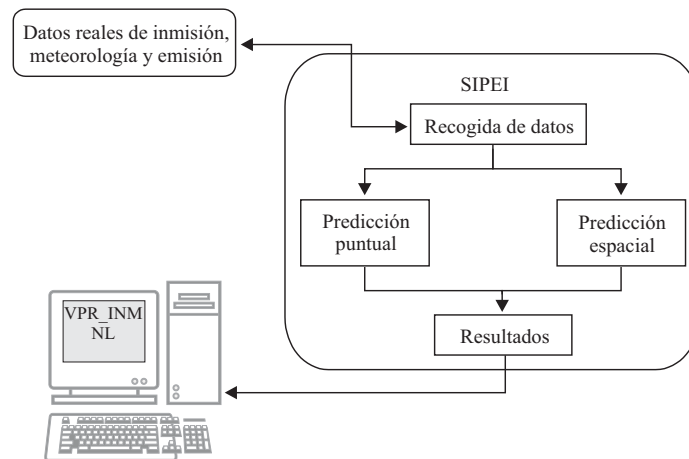
4. SISTEMA DE PREDICCIÓN ESTADÍSTICA DE INMISIÓN

Los objetivos del Sistema de Predicción Estadística de Inmisión (SIPEI), desarrollado por el Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Santiago de Compostela, son los siguientes:

- Predecir con media hora y con una hora de anticipación la evolución de los niveles de dióxido de azufre en el entorno de la central térmica de As Pontes.

- Realizar los cálculos en el menor tiempo posible con el fin de maximizar el tiempo disponible de intervención en el proceso para efectuar la reducción de emisiones.
- Sugerir una posible línea de actuación con el fin de no superar el nivel de referencia establecido para la concentración de dióxido de azufre.

Figura 2.- Esquema de funcionamiento de SIPEI



SIPEI trabaja basándose en dos fuentes de datos:

- Datos en tiempo real: SIPEI recibe cada cinco minutos datos reales de las distintas estaciones de inmisión de la red de vigilancia de la central térmica de As Pontes, datos de emisión de los grupos generadores y datos meteorológicos de la Estación Meteorológica de A Mourela.
- Datos históricos: los datos de cada instante son almacenados en unas bases de datos denominadas matrices históricas. Existe una matriz histórica distinta para cada una de las estaciones de la red de vigilancia, que se divide en estratos, según los niveles de inmisión, de manera que en cualquier instante la base de datos contiene información relevante sobre todos los niveles de inmisión que se hayan registrado en la historia de la estación a la que corresponde.

SIPEI trabaja en continuo: cada cinco minutos se reciben nuevos datos reales de inmisión, emisión y meteorología, y se estiman los niveles de SO₂ futuros en cada una de las estaciones. En la actualidad SIPEI ofrece 4 predicciones diferentes: predicción con un horizonte de media hora puntual y binaria, predicción con un horizonte de una hora y predicción espacial. Para realizar las predicciones se utilizan diferentes metodologías estadísticas:

- **Modelo semi-paramétrico:** este modelo es una combinación de un modelo no paramétrico y un modelo clásico de análisis de series temporales (ARIMA). Con él se realizan las predicciones puntuales (para cada una de las estaciones) con un horizonte de media hora, utilizando únicamente como variables explicativas el pasado de la propia serie de inmisión en cada una de las estaciones.
- **Modelo aditivo generalizado:** es un modelo probabilístico con respuesta binaria. Lo que analiza es la probabilidad de que se supere un cierto límite de inmisión fijado de antemano. Por lo tanto, este modelo proporciona en cada instante la probabilidad de superar ese límite fijado en la próxima media hora.
- **Modelo parcialmente lineal:** este modelo combina la metodología no paramétrica con los modelos lineales. Con él se realizan las predicciones puntuales con un horizonte de una hora, utilizando como variables explicativas el pasado de la serie de inmisión de cada estación, variables meteorológicas y variables de emisión.
- **Modelo de predicción espacial (Kriging):** este modelo se utiliza para proporcionar un mapa de niveles de inmisión para todo el entorno de la instalación.

Además de los modelos estadísticos, se ha desarrollado una aplicación informática que permite a los usuarios de SIPEI tener acceso a las predicciones, puntuales y espaciales, hacer gráficas de predicción y datos reales, visualizar los mapas de inmisión del entorno de la central y consultar datos históricos.

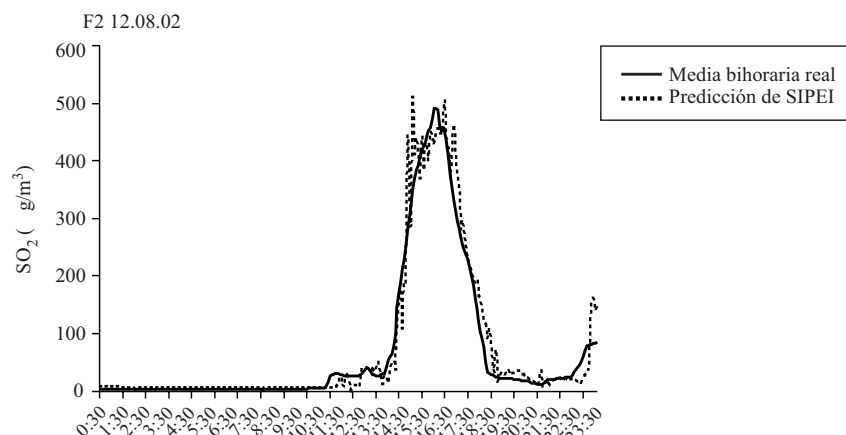
En el año 2001 se ha iniciado una nueva línea de trabajo con el fin de adaptar el SIPEI a los nuevos condicionantes que impone la Directiva 1999/30/CE del Consejo de la Unión Europea, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente.

Para ello se ha iniciado el desarrollo e implantación de un nuevo sistema de predicción basado en redes neuronales, cuyos resultados iniciales mejoran significativamente los obtenidos con los modelos utilizados hasta ahora, bajo las condiciones que impone la nueva directiva.

Se ha diseñado una topología de red neuronal capaz de predecir la concentración de dióxido de azufre en cada una de las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire, con media hora de antelación. Para la estimación de los parámetros de las redes neuronales se han diseñado conjuntos de entrenamiento que almacenan información relevante sobre episodios anteriores ocurridos en las estaciones. En la actualidad se trabaja en el diseño de nuevas topologías de redes neuronales que permitan incorporar en los modelos de predicción información de meteorología y de emisión.

Este nuevo desarrollo, innovador para control de la calidad del aire, dispone de cofinanciación de la Xunta de Galicia como proyecto de investigación en el área de medio ambiente (PGIDT01MAN04E).

Figura 3.- Ejemplo de funcionamiento de SIPEI en un episodio ocurrido en el entorno de la central térmica de As Pontes, estación F2, 12.08.2002



5. SISTEMA DE APOYO A LA DECISIÓN PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

El desarrollo de los sistemas de predicción de inmisión, basados en la aplicación de modelos orientados a emisor, se inició en la central térmica de As Pontes en la década de los años noventa a través de diversos proyectos de investigación en colaboración con los Departamentos de Ingeniería Química y de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Santiago.

El objetivo básico de estos sistemas es identificar con veinticuatro horas de anticipación situaciones meteorológicas desfavorables para el proceso de dispersión atmosférica del penacho emitido por la central térmica, estableciendo un sistema de pre-alertas y condiciones de operación.

En este caso, los datos de calidad del aire y meteorológicos disponibles en tiempo real en la Central Térmica no son utilizables, siendo imprescindible acudir a predicciones meteorológicas externas y a aplicar modelos de difusión atmosférica.

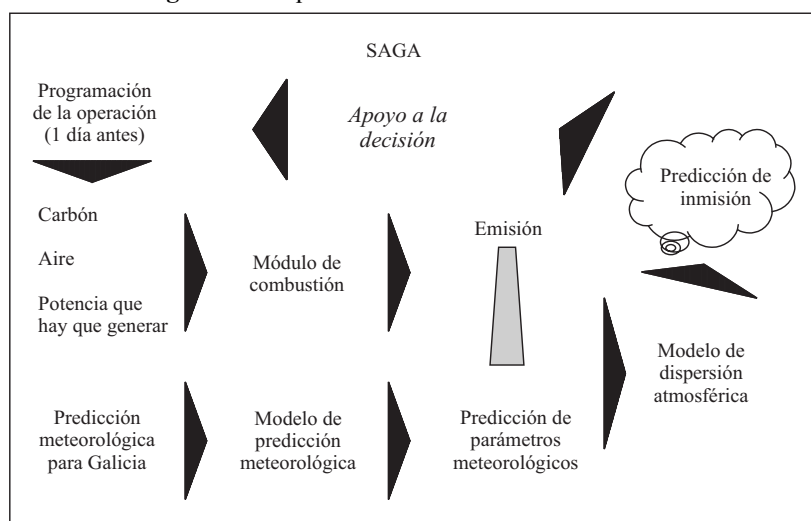
La predicción desarrollada utiliza tres modelos:

- Modelo de combustión: permite caracterizar las emisiones de la central térmica (composición y caudal de los gases) para diferentes mezclas de carbones y producciones eléctricas.
- Modelo de predicción meteorológica: permite generar campos de viento en tres dimensiones con una resolución de 1 km con veinticuatro horas de antelación, tomando como base una predicción meteorológica externa y la aplicación de un modelo no estacionario para obtener una mayor resolución temporal y espacial.

- Modelo de difusión atmosférica: permite calcular las concentraciones de dióxido de azufre, a nivel del suelo, para los posibles escenarios de emisión y con las condiciones meteorológicas definidas por el modelo de predicción meteorológica.

Las actividades de calibración experimental y ajuste de los modelos utilizados se han iniciado hace varios años y, en este momento, se dispone de cofinanciación de la Xunta de Galicia (PGIDT1C05E) para un proyecto de investigación cuyo objetivo es integrar todos los modelos previamente desarrollados creando una herramienta de gestión directamente utilizable en la central térmica de As Pontes.

Figura 4.- Esquema de funcionamiento del SAGA



Como resultado más sobresaliente, el SAGA proporcionará recomendaciones directas para la toma de decisiones sobre el modo óptimo de operación de la planta al día siguiente, considerando tanto las exigencias sobre calidad del aire como las alternativas de operación existentes en cada momento.

A fin de facilitar su utilización por los técnicos de la UPT As Pontes, SAGA debe ser una aplicación informática sobre entorno MS-Windows, con capacidad de gestionar y explotar toda la información generada por los modelos predictivos que incorpora, a través de un interface gráfico amigable. En el diseño de la aplicación se distinguen los siguientes elementos:

- Interface gráfico estilo MS-Windows, con capacidad de visualización de matrices de datos cuatridimensionales mediante gráficos 2D configurables, series temporales sobre localizaciones de interés e informes de texto de acuerdo con los requerimientos de la operación de la planta.

- Base de datos Oracle, para el almacenamiento de medidas y predicciones de los parámetros de interés: emisiones, meteorología, inmisión y modos de operación.
- Módulo de combustión, para la predicción de emisiones, a partir de los modos de operación seleccionados en planta.
- Modelo de predicción meteorológica y de dispersión acoplados, para predecir las condiciones meteorológicas y la dispersión de las emisiones predichas por el módulo de combustión, con una antelación de 24 horas: predicción meteorológica de inmisión.
- Módulo de transferencia de datos, para la recepción de medidas en tiempo real procedentes del MEDAS (sistema de gestión de la red de calidad atmosférica de la UPT As Pontes).

Se prevé también la adaptación al SAGA de modelos de diagnóstico meteorológico y dispersión, para la simulación en tiempo real del impacto las emisiones de la UPT As Pontes.

En las figuras 5 y 6 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos por los modelos matemáticos incorporados al SAGA con un día de antelación, donde se representa la distribución en altura del contaminante dióxido de azufre, en las que se observa un cambio significativo en la estructura del penacho procedente de la chimenea de la UPT As Pontes, a 350 m sobre el suelo, lo que facilita su dispersión hacia estratos superiores, evitando la aparición de episodios de alteración de la calidad del aire.

Figura 5.- Perfil de penacho previsto para o 02/08/96 a las 6:00 horas

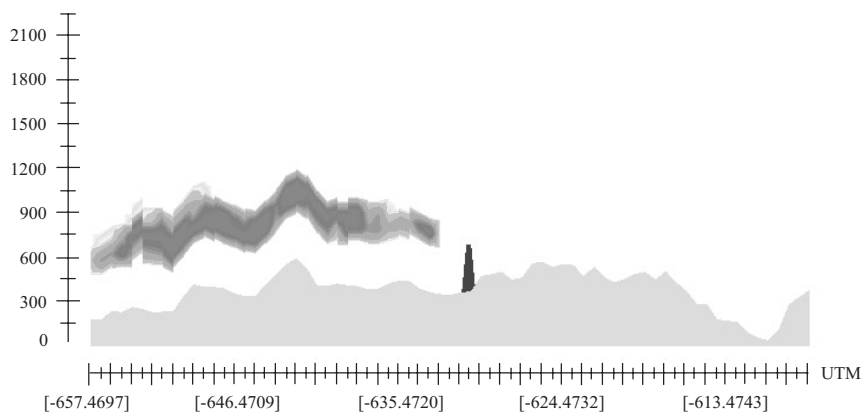
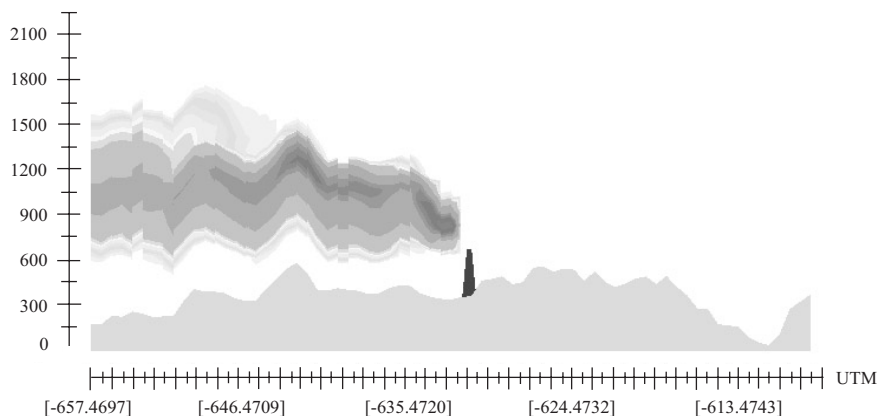


Figura 6.- Perfil de penacho previsto para o 02/08/96 a las 12:00 horas

BIBLIOGRAFÍA

- CASARES, J.J.; SOUTO, J.A.; LUCAS, T.; BERMÚDEZ, J.L. (1997): "Air Pollution Control at As Pontes Power Plant", *Workshop on Continuous Emissions Monitoring*. Londres: IEA Coal Research.
- CASTRO, M.C. DE (2000): *Calibración de modelos de dispersión atmosférica: Aplicación a un modelo de estructuras adaptables*. (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela.
- CREMADES, L.; BALDASANO, J.M.; SOUTO, J.A.; CASARES, J.J.; ROVIRA, J.; ABADÍA, J. (1998): "Sistema en tiempo real para el control del impacto atmosférico de CC.TT.", *Energía*, (enero-febrero), núm. 4, pp. 47-53.
- FERNÁNDEZ DE CASTRO, B.M.; PRADA SÁNCHEZ, J.M.; GONZÁLEZ MANTEIGA, W.; FEBRERO BANDE, M.; BERMÚDEZ CELA, J.L.; HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, J.J. (2002): "Prediction of SO₂ Level Using Neural Networks", *Journal of the Air & Waste Management Association* (en prensa).
- GARCÍA JURADO, I.; GONZÁLEZ MANTEIGA, W.; PRADA SÁNCHEZ, J.M.; FEBRERO BANDE, M.; CAO, R. (1995): "Predicting Using Box-Jenkins, Nonparametric and Bootstrap Techniques", *Technometrics*, 37, pp. 303-310.
- GONZÁLEZ MANTEIGA, W.; PRADA SÁNCHEZ, J.M.; CAO, R.; GARCÍA JURADO, I.; FEBRERO BANDE, M.; LUCAS DOMÍNGUEZ, T. (1993): "Time-series Analysis for Ambient Concentrations", *Atmospheric Environment*, 27A, 2, pp. 153-158.
- PRADA SÁNCHEZ, J.M.; FEBRERO BANDE, M. (1997): "Parametric, Non-parametric and Mixed Approaches to Prediction of Sparsely Distributed Pollution Incidents: A Case Study", *Journal of Chemometrics*, 11, pp. 13-32.
- PRADA SÁNCHEZ, J. M.; FEBRERO BANDE, M.; COTOS YÁNEZ, T.; GONZÁLEZ MANTEIGA, W.; BERMÚDEZ CELA, J.L.; LUCAS DOMÍNGUEZ, T. (2000): "Prediction of SO₂ Pollution Incidents Near a Power Station Using Partially Linear Models and a Historical Matrix of Predictor-response Vectors", *Environmetrics*, 11, pp. 209-225.

SOUTO, J.A.; PÉREZ MUÑUZURI, V.; DE CASTRO, M.; CASARES, J.J.; ABADÍA, J. (1996): “Application of Short and 24 Hours air Pollution Forecasting Around a Power Plant”, *Air Pollution* 96. Toulouse.

SOUTO, J.A.; PÉREZ MUÑUZURI, V.; DE CASTRO, M.; SOUTO, M.J.; CASARES, J.J.; LUCAS, T. (1998): “Forecasting and Diagnostic Analysis of Plume Transport Around a Power Plant”, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 37, pp. 1068-1083.

SOUTO, M.J.; SOUTO, J.A.; PÉREZ MUÑUZURI, V.; CASARES, J.J.; BERMÚDEZ, J.L. (2001): “A Comparison of Operational Lagrangian Particle and Adaptive Puff Models for Plume Dispersion Forecasting”, *Atmospheric Environment*, vol. 35, núm. 13, pp. 2349-2360.