

SISTEMAS DE CONTROL SUPLEMENTARIO DA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

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

JOSÉ A. SOUTO GONZÁLEZ***

*Sección de Medio Ambiente

UPT As Pontes-Endesa Xeración S.A.

**Departamento de Estadística e Investigación Operativa

Facultade de Matemáticas

Universidade de Santiago de Compostela

***Departamento de Enxeñería Química

Facultade de Química

Universidade de Santiago de Compostela

Recibido: 29 outubro 2002

Aceptado: 25 novembro 2002

Resumo: Os sistemas de control suplementario da contaminación atmosférica, baseados en efectuar cambios nas condicións de operación para reduci-las emisións atmosféricas en condicións meteorolóxicas adversas, permiten evita-la aparición de episodios significativos de alteración da calidade do ar.

Para que estes sistemas sexan eficaces necesítase dispoñer de ferramentas de predicción concebidas como elementos de apoio da toma de decisións para a operación das instalacións.

A central térmica de As Pontes-Endesa implantou dous sistemas de predicción, desenvolvidos mediante proxectos de investigación en colaboración coa Universidade de Santiago de Compostela. Por un lado, o Sistema de Predicción Estatística de Inmisión (SIPEI), que realiza prediccións a moi curto prazo (media e unha hora) utilizando modelos orientados ó receptor a partir dos datos da rede de vixilancia, e que foi desenvolvido polo Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Por outro lado, o Sistema de Apoio para a Xestión da Calidade do Ar (SAGA), que realiza prediccións a medio prazo (24 horas) utilizando un modelo de difusión atmosférica a partir de datos de predicción meteorolóxica e de emisións e que foi desenvolvido polos Departamentos de Enxeñería Química e de Física da Materia Condensada.

Actualmente, continúan as actividades de optimización e de adaptación dos sistemas ás novas directivas de calidade do ar, dispoñendo de cofinanciamento da Xunta de Galicia.

Palabras clave: Calidade do ar / Sistemas de control suplementario / Predicción estatística / 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

A degradación do medio natural é un dos problemas máis urxentes do mundo actual, que se intensificou nas últimas décadas polo acelerado crecemento da poboación humana e polo consumo incontrolado dos recursos naturais.

En gran parte esta degradación asocíase ó que coñecemos como contaminación atmosférica, é dicir, a incorporación á atmosfera de substancias ou de formas de enerxía que producen cambios non desexados nas súas características físicas, químicas ou biolóxicas e que poden afectarlles negativamente ós seres vivos ou ós bens materiais en contacto con eles.

Existen dous posibles enfoques nas estratexias de loita contra a contaminación atmosférica:

- A fixación de normas de calidade de ar que non poidan excederse.
- O control das emisións mediante o emprego da mellor tecnoloxía dispoñible.

Se a estratexia se centrase só no mantemento dunha calidade de ar admisible, poderían orixinarse discriminacións entre as distintas actividades que se van instalando nunha zona. Pola contra, se a estratexia só se centrase no control das emisións, poderían orixinarse situacións episódicas que lle afectarían seriamente á calidade do ar debido á influencia de factores como a densidade de fontes emisoras, as condicións meteorolóxicas e a topografía da zona.

A estratexia óptima será, xa que logo, unha combinación dos enfoques anteriores:

- Control dos novos focos de emisión baseado nas mellores tecnoloxías dispoñibles.
- Control das emisións dos focos existentes e adaptación progresiva ás esixencias dos novos.
- Vixilancia e control da calidade do ar, co fin de manter uns niveis de contaminación que non produzan efectos adversos sobre a saúde humana e sobre os ecosistemas.

Esta estratexia está sendo utilizada na Unión Europea, que incorporou nos últimos anos tres figuras legislativas claves para o control da contaminación atmosférica en Europa:

- A directiva 1996/61/CE relativa á prevención e control integrado da contaminación (IPPC).
- A directiva 1996/62/CE sobre avaliación e xestión do ar ambiente.

- A directiva 2001/81/CE sobre teitos nacionais de emisión de determinados contaminantes atmosféricos.

Neste marco combinado de actuacións enfocadas á redución das emisións atmosféricas e ó control da calidade do ar a nivel do solo inscribíense os denominados sistemas de control suplementario da contaminación atmosférica, dos que describimos a continuación o seu fundamento e a súa utilización práctica na central térmica As Pontes.

2. TÉCNICAS DE PREDICCIÓN DE INMISIÓN

A aplicación de sistemas de control suplementario da contaminación atmosférica en instalacións industriais baséase en efectuar cambios nas condicións de operación que supoñan unha redución das emisións, cando existan condicións meteorolóxicas adversas que poderían orixinar episodios significativos de alteración da calidade do ar.

Para que estes sistemas sexan eficaces necesítase:

- Información en tempo real de emisións, da calidade do ar e da meteoroloxía.
- Posibilidade técnica de redución das emisións mediante modificacións no proceso.
- Implantación de técnicas de predicción da calidade do ar.

As técnicas de predicción, concibidas como ferramentas de apoio á toma de decisións na operación das instalacións, poden clasificarse en dous grandes grupos:

- Modelos orientados ó receptor: estes modelos tratan de reconstruí-la contribución de cada foco emisor a cada foco receptor considerado, sen ter en conta xeralmente os patróns de dispersión que seguen os contaminantes. Polo tanto, estes modelos utilizan medidas das concentracións de contaminantes no ar ambiente obtidas en tempo real, complementadas xeralmente con datos meteorolóxicos para aprender delas, buscando a contribución a estas medidas que se produciu desde diferentes focos emisores. Este tipo de modelos utilízase para realizar prediccións a moi curto prazo.
- Modelos orientados ó emisor: estes modelos, dos que a representación máis importante son os modelos de difusión atmosférica, tratan de defini-la distribución dunha substancia estraña que se emite á atmosfera, baseándose na representación matemática dos diferentes fenómenos de transporte e transformación que pode experimentar esta substancia. Este tipo de modelos necesitan datos de predicción meteorolóxica e de emisións e utilízanse para realizar prediccións a medio prazo.

3. CONTROL SUPLEMENTARIO DA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA NA CENTRAL TÉRMINA DAS PONTES

O control da calidade do ar nos arredores das centrais térmicas efectúase habitualmente por medio da instalación de redes de medida dos niveis de inmisión, sendo un dos seus obxectivos fundamentais alertar de episodios puntuais de contaminación que poden aparecer baixo condicións meteorolóxicas específicas.

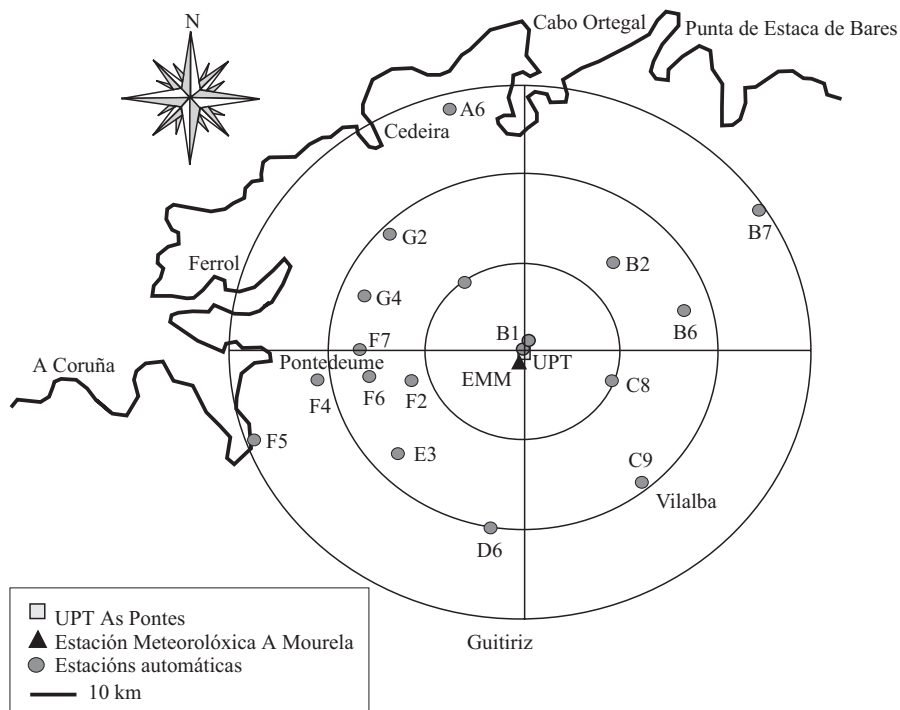
No caso da central térmica das Pontes dispónse dun sistema de seguimento e control da calidade atmosférica formado polos seguintes elementos:

- Sistema de control de emisións: dotado de medicións en continuo de dióxido de xofre, óxidos de nitróxeno, partículas, osíxeno, temperatura e caudal para cada un dos grupos que constitúen a central térmica.
- Rede de vixilancia da calidade do ar: formada por 17 estacións automáticas con monitores de dióxido de xofre, óxidos de nitróxeno e partículas en suspensión, distribuídas arredor da central térmica e comunicadas con esta a través da radio. Adicionalmente, algunhas estacións dispoñen de medidas de ozono e variables meteorolóxicas.
- Estación meteorolóxica: dotada dun mastro de 80 m de altura con medidas de temperatura, velocidade e dirección do vento a distintos niveis, así como sensores de humidade relativa, precipitación, radiación solar e presión atmosférica ó nivel do chan.
- Unidade central de adquisición de datos e xestión da información: recibe e xestiona toda a información ambiental, dispoñendo de periféricos nas salas de control. O Laboratorio de Medio Ambiente da Xunta de Galicia ten acceso en tempo real, mediante comunicación telefónica, á base de datos bruta da rede de vixilancia.

A partir da información existente, a central térmica implantou un sistema de control suplementario da contaminación atmosférica, de modo que en presenza de condicións meteorolóxicas adversas ó proceso de difusión do penacho emitido e/ou á aparición de episodios de alteración da calidade do ar, realiza dous tipos de actuacións encamiñadas a reduci-las súas emisións atmosféricas:

- Modificación das mesturas de carbóns de consumo, co fin de utilizar ata un 100% de carbón de importación, caracterizado polos seus baixos contidos en xofre e cinzas.
- Diminucións da produción eléctrica dos grupos xeradores.

Posto que este tipo de episodios se caracterizan por cambios bruscos e pronunciados nas concentracións ambientais medidas, é indispensable dispoñer de sistemas de predicción de inmisión como elemento de axuda á toma de decisións na operación da instalación.

Figura 1.- Rede de vixilancia da calidade do ar

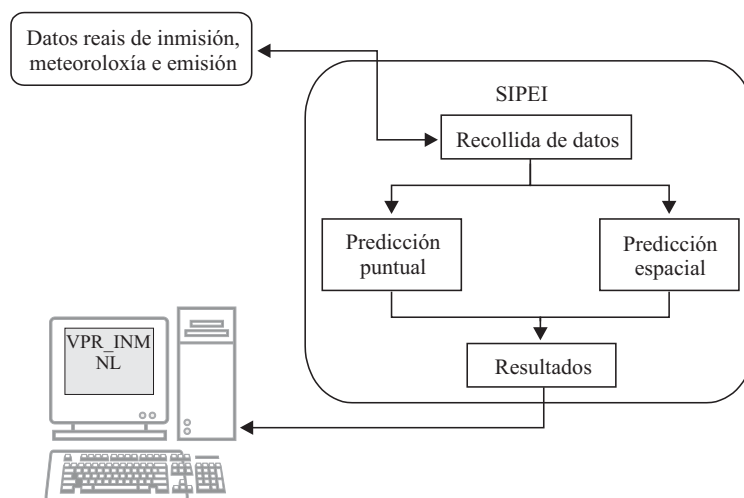
Para iso desenvolvéronse dúas liñas de traballo diferenciadas, en ámbolos dous casos en colaboración coa Universidade de Santiago de Compostela, mediante proxectos de investigación que dispoñen de cofinanciamento externo:

- Sistema de Predicción Estatística de Inmisión (SIPEI): realiza prediccións a moi curto prazo (media e unha hora) utilizando modelos orientados ó receptor baseados nos datos que subministra a rede de vixilancia.
- Sistema de Apoio para a Xestión da Calidade do Ar (SAGA): realiza prediccións a medio prazo (vintecatro horas) utilizando un modelo de difusión atmosférica a partir de datos de predicción meteorolóxica e de emisións.

4. SISTEMA DE PREDICCIÓN ESTATÍSTICA DE INMISIÓN

Os obxectivos do Sistema de Predicción Estatística de Inmisión (SIPEI), desenvolvido polo Departamento de Estatística e Investigación Operativa da Universidade de Santiago de Compostela, son os seguintes:

- Predicir con media hora e cunha hora de anticipación a evolución dos niveis de dióxido de xofre na contorna da central térmica das Pontes.
- Realiza-los cálculos no menor tempo posible co fin de maximiza-lo tempo dispoñible de intervención no proceso para efectua-la redución de emisións.
- Suxerir unha posible liña de actuación co fin de non supera-lo nivel de referencia establecido para a concentración de dióxido de xofre.

Figura 2.- Esquema de funcionamento do SIPEI

SIPEI traballa baseándose en dúas fontes de datos:

- Datos en tempo real: SIPEI recibe cada cinco minutos datos reais das distintas estacións de inmición da rede de vixilancia da central térmica das Pontes, datos de emisión dos grupos xeradores e datos meteorolóxicos da Estación Meteorolóxica da Mourela.
- Datos históricos: os datos de cada instante son almacenados nunhas bases de datos denominadas matrices históricas. Existe unha matriz histórica distinta para cada unha das estacións da rede de vixilancia, que se divide en estratos, segundo os niveis de inmición, de maneira que en calquera instante a base de datos contén información relevante sobre tódolos niveis de inmición que se recollen na historia da estación á que corresponde.

SIPEI traballa en continuo: cada cinco minutos recíbense novos datos reais de inmición, de emisión e de meteoroloxía, e estímase os niveis de SO₂ futuros en cada unha das estacións. Na actualidade SIPEI ofrece 4 prediccións diferentes: predicción cun horizonte de media hora puntual e binaria, predicción cun horizonte

dunha hora e predicción espacial. Para realiza-las prediccións utilízanse diferentes metodoloxías estatísticas:

- **Modelo semi-paramétrico:** este modelo é unha combinación dun modelo non paramétrico e dun modelo clásico de análise de series temporais (ARIMA). Con el realízanse as prediccións puntuais (para cada unha das estacións) cun horizonte de media hora, utilizando unicamente como variables explicativas o pasado da propia serie de inmisión en cada unha das estacións.
- **Modelo aditivo xeneralizado:** é un modelo probabilista con resposta binaria. O que analiza é a probabilidade de que se supere un certo límite de inmisión fixado de antemán. Polo tanto, este modelo proporciona en cada instante a probabilidade de superar ese límite fixado na próxima media hora.
- **Modelo parcialmente lineal:** este modelo combina a metodoloxía non paramétrica cos modelos lineais. Con el realízanse as prediccións puntuais cun horizonte de unha hora, utilizando como variables explicativas o pasado da serie de inmisión de cada estación, variables meteorolóxicas e variables de emisión.
- **Modelo de predicción espacial (Kriging):** este modelo utilízase para proporcionar un mapa de niveis de inmisión para toda a contorna da instalación.

Ademais dos modelos estatísticos, desenvolveuse unha aplicación informática que lles permite ós usuarios de SIPEI ter acceso ás prediccións, puntuais e espaciais, facer gráficas de predicción e datos reais, visualiza-los mapas de inmisión da contorna da central e consultar datos históricos.

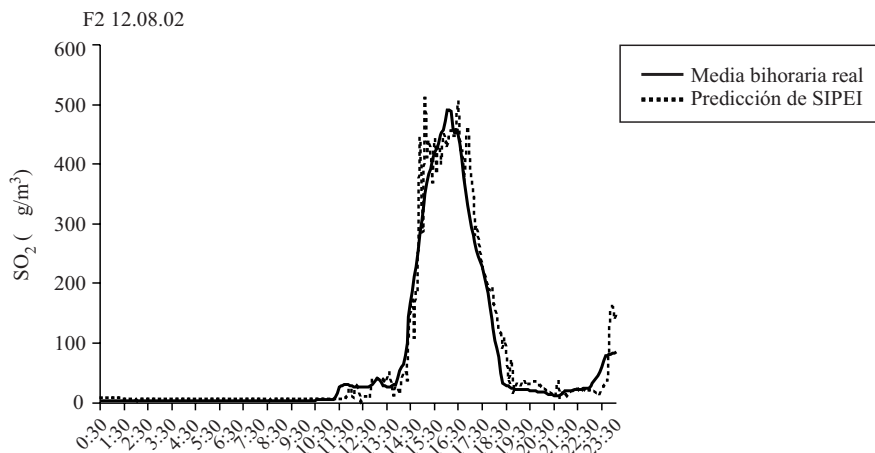
No ano 2001 iniciouse unha nova liña de traballo co fin de adapta-lo SIPEI ós novos condicionantes que impón a Directiva 1999/30/CE do Consello da Unión Europea, de 22 de abril de 1999, relativa ós valores límite de dióxido de xofre, dióxido de nitróxeno e óxidos de nitróxeno, partículas e chumbo no ar ambiente.

Para iso iniciouse o desenvolvemento e a implantación dun novo sistema de predicción baseado en redes neuronais, cuns resultados iniciais que melloran significativamente os obtidos cos modelos utilizados ata agora, baixo as condicións que impón a nova directiva.

Deseñouse unha topoloxía de rede neuronal capaz de predici-la concentración de dióxido de xofre en cada unha das estacións da rede de vixilancia da calidade do ar, cunha media hora de antelación. Para a estimación dos parámetros das redes neuronais deseñáronse conxuntos de adestramento que almacenan información relevante sobre episodios anteriores ocorridos nas estacións. Na actualidade trabállase no deseño de novas topoloxías de redes neuronais que permitan incorporar nos modelos de predicción información de meteoroloxía e de emisión.

Este novo desenvolvemento, innovador para controla-la calidade do ar, dispón de cofinanciamento da Xunta de Galicia como proxecto de investigación na área de medio ambiente (PGIDT01MAN04E).

Figura 3.- Exemplo de funcionamento de SIPEI nun episodio ocorrido na contorna da central térmica de As Pontes, estación F2, 12.08.2002



5. SISTEMA DE APOIO Á DECISIÓN PARA A XESTIÓN DA CALIDADE DO AR

O desenvolvemento dos sistemas de predicción de inmisión, baseados na aplicación de modelos orientados ó emisor, iniciouse na central térmica das Pontes na década dos anos noventa a través de diversos proxectos de investigación en colaboración cos Departamentos de Enxeñería Química e de Física da Materia Condensada da Universidade de Santiago de Compostela.

O obxectivo básico destes sistemas é identificar con vinte e catro horas de anticipación situacións meteorolóxicas desfavorables para o proceso de dispersión atmosférica do penacho emitido pola central térmica, establecendo un sistema de pre-alertas e condicións de operación.

Neste caso, os datos de calidade do ar e meteorolóxicos dispoñibles en tempo real na central térmica non son utilizables, sendo imprescindible acudir a prediccións meteorolóxicas externas e a aplicar modelos de difusión atmosférica.

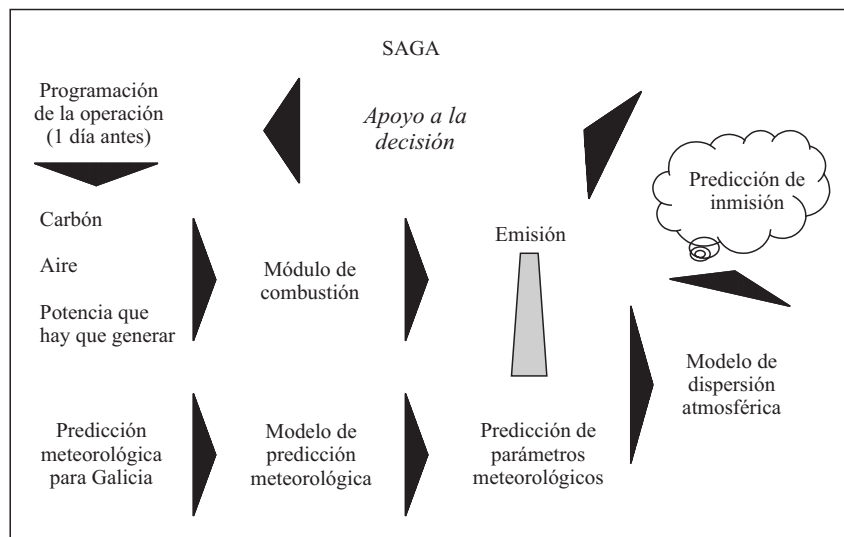
A predicción desenvolvida utiliza tres modelos:

- Modelo de combustión: permite caracteriza-las emisións da central térmica (composición e caudal dos gases) para diferentes mesturas de carbóns e producións eléctricas.
- Modelo de predicción meteorolóxica: permite xerar campos de vento en tres dimensións cunha resolución de 1 km con vinte e catro horas de antelación, tomando como base unha predicción meteorolóxica externa e a aplicación dun modelo non estacionario para obter unha maior resolución temporal e espacial.

- Modelo de difusión atmosférica: permite calcula-las concentracions de dióxido de xofre, a nivel do chan, para os posibles escenarios de emisión e coas condicións meteorolóxicas definidas polo modelo de predicción meteorolóxica.

As actividades de calibración experimental e axuste dos modelos utilizados iniciáronse hai varios anos e, neste momento, dispónse de cofinanciamento da Xunta de Galicia (PGIDT1C05E) para un proxecto de investigación que ten como obxectivo integrar tódolos modelos previamente desenvolvidos creando unha ferramenta de xestión directamente utilizable na central térmica das Pontes.

Figura 4.- Esquema de funcionamento do SAGA



Como resultado máis sobresaínte, o SAGA proporcionará recomendacións directas para a toma de decisións sobre o modo óptimo de operación da planta o día seguinte, considerando tanto as esixencias sobre calidade do ar como as alternativas de operación existentes en cada momento.

A fin de facilita-la súa utilización polos técnicos da UPT As Pontes, SAGA debe ser unha aplicación informática sobre contorna MS-Windows, con capacidade de xestionar e explotar toda a información xerada polos modelos predictivos que incorpora, a través dunha interface gráfica amigable. No deseño da aplicación distínguense os seguintes elementos:

- Interface gráfica estilo MS-Windows, con capacidade de visualización de matri- ces de datos cuádrimensionais mediante gráficas 2D configurables, series tem-

porais sobre localizacións de interese e informes de texto de acordo cos requirimentos da operación da planta.

- Base de datos Oracle, para o almacenamento de medidas e prediccións dos parámetros de interese: emisións, meteoroloxía, inmisión e modos de operación.
- Módulo de combustión, para a predicción de emisións, a partir dos modos de operación seleccionados na planta.
- Modelo de predicción meteorolóxica e de dispersión axustados, para predición das condicións meteorolóxicas e a dispersión das emisións preditas polo módulo de combustión, cunha antelación de 24 horas: predicción meteorolóxica de inmisión.
- Módulo de transferencia de datos, para a recepción de medidas en tempo real procedentes do MEDAS (sistema de xestión da rede de calidade atmosférica da UPT As Pontes).

Prevese tamén a adaptación ó SAGA de modelos de diagnóstico meteorolóxico e dispersión, para a simulación en tempo real do impacto das emisións da UPT As Pontes.

Nas figuras 5 e 6 preséntase un exemplo dos resultados obtidos polos modelos matemáticos incorporados ó SAGA cun día de antelación, onde se representa a distribución en altura do contaminante dióxido de xofre, nas que se observa un cambio significativo na estrutura do penacho procedente da cheminea da UPT As Pontes, a 350 m sobre o chan, o que facilita a súa dispersión cara a estratos superiores, evitando a aparición de episodios de alteración da calidade do ar.

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

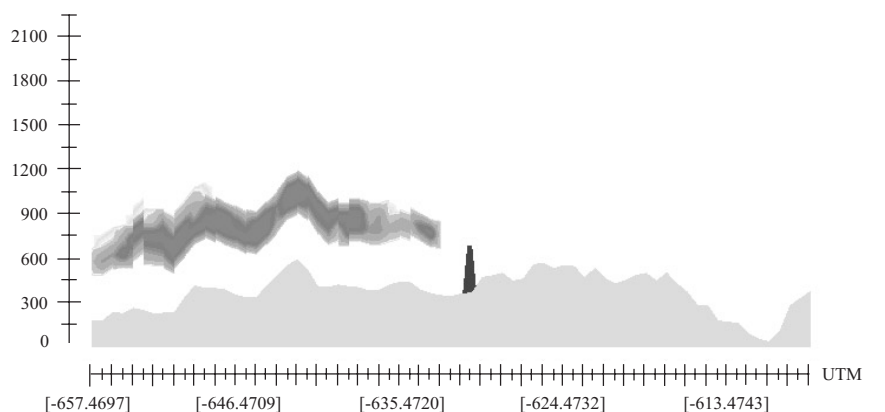
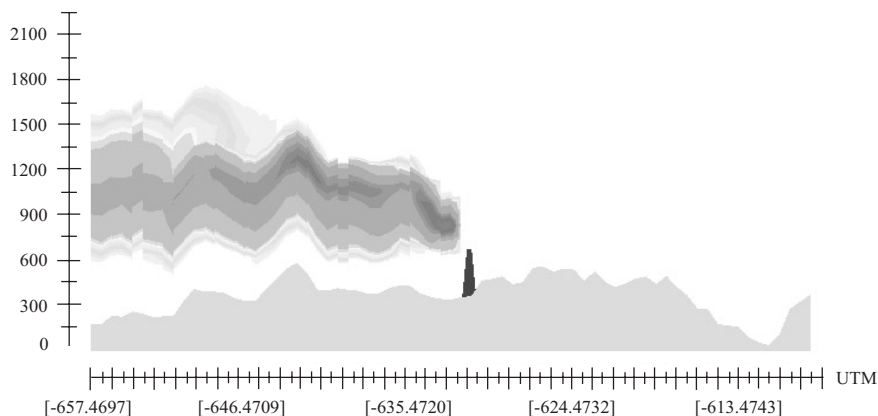


Figura 6.- Perfil de penacho previsto para o 02/08/96 ás 12:00 horas

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*. (Tese de doutoramento). Universidade 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*, (xaneiro-febreiro), 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.