

**Reducción de Emisiones de NO<sub>x</sub>  
en la Combustión  
de Carbones Antracitosos  
“RENOX”  
(C-21-378)**

**Titular: ENDESA**



Depósito Legal: M-4557-1998  
ISSN: 1138-7041  
NIPO: 402-01-007-8

## **DISCLAIMER**

**Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.**

## PROJECT C-21-378 "RENOX": ABSTRACT

The present project, whose abbreviated name is RENOX, has the aim of reducing NO<sub>x</sub> emissions from the combustion of hard coals or coals with low volatile matter contents. It is applied to the combustion of these coals in arc boilers (or "U" boilers), where the necessary combination of long presence times and high hearth temperatures facilitates the high NO<sub>x</sub> levels reached.

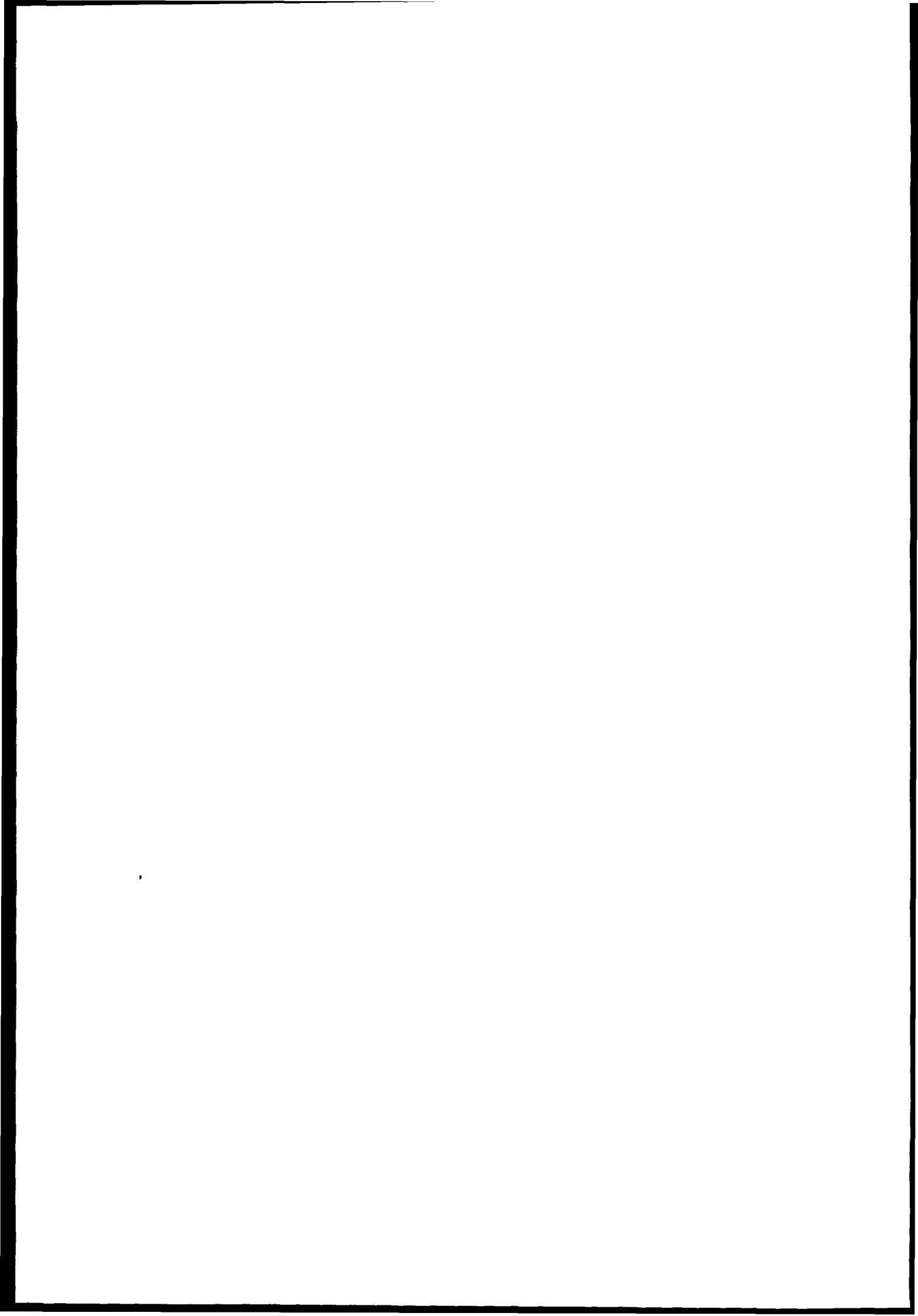
The intended reduction in emissions is approached through the application of primary combustion measures, also known as adjustment or refining of combustion. This solution is adopted for two reasons: due to its efficiency in environmental and economic terms; and because it is an unavoidable step if the levels to be attained require the installation of specific gas scrubbing systems (secondary measures).

The practical nature of RENOX has led to the development of the project in two phases, corresponding to two logical stages: phase 1, associated with the RNA project, on the characterization of emissions and combustion, complex numeric modelling of flows inside the boiler, and determination of the viability and scope of the optimization of emissions; and phase 2, the OPTINOX project, which follows the methodology and lessons of the first phase and, as a natural continuation of this, deals with the design, development, manufacturing and validation of a computerized system that processes real time data on the boiler where it is installed to monitor, supervise and control the commercial operation of the plant, optimizing its combustion efficiency and/or NO<sub>x</sub> emissions. The practical objective of this project is represented by the construction of a validated prototype to demonstrate the OPTINOX system, which is capable of determining operating and control strategies that can minimize NO<sub>x</sub> emissions without unfavourably affecting the productivity and specific consumption of the units.

Phase 1 development activities took place in groups 3, 4 and 5 of Compostilla II thermal power plant. The RNA project demonstrated the efficiency of the selected primary measures, assembled in a knowledge bank obtained through the performance of real parametric tests and the use of CFD codes. With the use of this knowledge bank, the processing of parameters obtained from local combustion monitoring instruments, and the use of powerful artificial intelligence tools (neural networks, genetic algorithms and fuzzy logic expert systems), the OPTINOX system was designed and manufactured. This second part of the project was applied and installed in group 3 of this power plant.

The OPTINOX system has a fully open design and is easily adaptable to any type of boiler (not only arc boilers), so it can be applied in the optimization of productivity and/or NO<sub>x</sub> emissions with any boiler-coal combination for which previous knowledge is available on how to optimize combustion. This knowledge bank can be achieved following the application of the same methodology for the acquirement of knowledge and use of tools used in the first part of the RENOX project.

The application of this project in ENDESA group is considered to be achieving a more than 1% (one) improvement in full load combustion efficiency and a reduction of up to 30% (thirty) in NO<sub>x</sub> emission levels, depending on the operating scenario, without this appreciably affecting specific consumption levels.



## INDICE

- 1.- ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION
- 2.- OBJETO DEL PROYECTO "RENOX"
- 3.- PLANTEAMIENTO Y ORGANIZACIÓN
- 4.- Proyecto RENOX, fase 1: PROYECTO RNA
  - 4.1.- OBJETO
  - 4.2.- ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DE ACTIVIDADES
    - 4.2.1.- Actividades y trabajos previos
    - 4.2.2.- Definición y desarrollo de las campañas de medida en el Grupo 4
    - 4.2.3.- Resultados de las pruebas en el Grupo 4
    - 4.2.4.- Actividades y resultados de las pruebas en el Grupo 5
    - 4.2.5.- Actividades en el Grupo 3
      - 4.2.5.1.- Alcance y definición de las campañas de medida
      - 4.2.5.3.- Resumen de resultados
    - 4.2.6.- Actividades de modelización fluidodinámica (CFDs)
    - 4.2.7.- Comparación de resultados del Grupo 3 y Grupos 4 y 5
    - 4.2.8.- Elaboración de recomendaciones operativas
- 5.- Proyecto RENOX, fase 2: PROYECTO OPTINOX
  - 5.1.- OBJETIVO
  - 5.2.- CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
  - 5.3.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA
  - 5.4.- ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DE ACTIVIDADES
    - 5.4.1.- Fase 1: aseguramiento de la calidad de señales críticas
    - 5.4.2.- Fase 2: implantación de instrumentación adicional de planta
    - 5.4.3.- Fase 3: desarrollo de los modelos matemáticos, SW y HW
    - 5.4.4.- Fase 4: implementación del sistema
  - 5.5.- RESULTADOS OBTENIDOS
  - 5.6.- CONCLUSION

## 1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

España es uno de los países que presenta mayor cuota de producción eléctrica basada en carbones antracíticos. Unos nueve millones de toneladas métricas de estos carbones de bajo contenido en volátiles son quemados en calderas de doble arco (o en "U") con quemadores verticales, diseñadas específicamente para proporcionar una solución a la difícil ignición y combustión de este tipo de carbones, de muy baja reactividad (Figura 1).

Los altos niveles térmicos y tiempos de residencia conseguidos en esas calderas, así como el bajo contenido en volátiles de los carbones antracíticos, provocan unas emisiones de  $\text{NO}_x$  superiores a las producidas en la combustión de otros tipos de carbón, llegándose a encontrar, con bastante frecuencia, niveles de emisión en el entorno de los  $2000 \text{ mg/Nm}^3$ .

En la fecha de aprobación de este proyecto las emisiones de  $\text{NO}_x$  en las calderas de antracitas entonces existentes en España no se encontraban limitadas por la legislación, existiendo, únicamente, una restricción de  $1300 \text{ mg/Nm}^3$ , expresados al 6% de  $\text{O}_2$ , para aquellas unidades de nueva construcción. Aun cuando esta situación hoy persiste, el presumible endurecimiento de los niveles de  $\text{NO}_x$  en el seno de la Unión Europea, en general, y en España, en particular, hizo prever entonces, y aún más lo hace hoy, que la obligatoriedad para aquéllas de adaptars sus emisiones a dicho límite, es un escenario de operación muy probable.

El empleo de sistemas de desnitrificación para el cumplimiento de esos potenciales límites futuros, tales como el tratamiento de los gases de combustión mediante sistemas de abatimiento por reducción catalítica, encuadrados dentro de las llamadas medidas secundarias, es una alternativa muy costosa, tanto en lo que respecta a inversión como a los costes de operación y mantenimiento. Por ello, sólo se justifica su implantación cuando, una vez adoptados mecanismos de reducción basados en medidas primarias (o de ajustes de combustión), los niveles alcanzados no son suficientes.

Por otro lado, la reducción de emisiones de  $\text{NO}_x$  mediante la adopción de medidas primarias, debe hacerse actuando sobre la combustión de cada grupo térmico sin penalizar excesivamente su consumo específico, ni comprometer la disponibilidad de la planta. Su materialización supone determinar los valores óptimos de los parámetros de combustión para cada escenario de carga y combustible a quemar y el posterior ajuste y supervisión de los elementos de regulación de operación existentes. Dicha determinación exige un estudio en profundidad de la importancia relativa de los distintos mecanismos de generación de  $\text{NO}_x$ , en función de los procesos concretos de combustión producidos en cada entorno caldera-combustible-condiciones de operación.

En este sentido hay que mencionar que en el tiempo en que se concibió este proyecto (inicios de 1993) no había apenas referencias en el mundo sobre la efectividad de la aplicación de medidas primarias en la reducción de emisiones de  $\text{NO}_x$  y el mantenimiento del consumo específico, en calderas de arco quemando combustibles con bajos y muy bajos contenidos en volátiles. Eran numerosas, por el contrario, las referentes a calderas frontales y tangenciales quemando carbones bituminosos y lignitos.

Asimismo, es un hecho conocido que calderas semejantes que emplean idéntico combustible pueden presentar niveles de producción de  $\text{NO}_x$  muy dispares, como sucede entre los Grupos 4 y 5 de C.T. Compostilla, con niveles de  $\text{NO}_x$  en el entorno de los  $1800 \text{ mg/Nm}^3$ , con respecto al Grupo 3 de esa central, con emisiones características de  $1100\text{-}1200 \text{ mg/Nm}^3$ . De esta forma, resulta evidente el

interés por determinar las condiciones que gobiernan la generación de NO<sub>x</sub> en estas calderas de bajas emisiones y discriminar si éstas se derivan exclusivamente de diferencias constructivas o de diseño, de difícil extrapolación a otras unidades, o si, por el contrario, están asociadas a elementos operativos o tecnológicos concretos que sí admiten una fácil extensión a otras calderas.

En este contexto, nace el objetivo principal del proyecto "Reducción de Emisiones de NO<sub>x</sub> en la Combustión de Carbones Antracitosos", financiado por OCICARBON y con código C-21-378. Su naturaleza aconsejó plantear su desarrollo en dos etapas. La primera (proyecto RNA) de estudio y caracterización de las emisiones de NO<sub>x</sub> en relación con los parámetros de combustión de calderas de arco concretas, así como de estudios de modelización fluido dinámica avanzada (CFD,s) que permitieran, apoyándose mutuamente, determinar las posibilidades reales de reducción de dichas emisiones y sus repercusiones en la economía y explotación de las plantas. En la segunda (proyecto OPTINOX) y habida cuenta de la complejidad de regulación de estas calderas, el desarrollo y validación de un sistema "en línea" avanzado de minimización de emisiones de NO<sub>x</sub> y optimización de rendimiento de calderas quemando combustibles de bajo contenido en volátiles. Con la finalización del RENOX se pretendía, en suma, determinar la capacidad de reducción de dichas emisiones aplicando únicamente medidas primarias sin merma de consumo específico, y fijar, eventualmente, los niveles de partida sobre los que dimensionar los sistemas secundarios requeridos para alcanzar el límite citado de 1300 mg/Nm<sup>3</sup> de posible aplicación futura.

Por otra parte, el interés de este proyecto se ve acentuado por las nuevas condiciones de operación de la plantas donde se desarrolló, toda vez que como consecuencia de la liberación del mercado eléctrico en España, se han visto obligadas a pasar de funcionar de un régimen normal de carga nominal (o base) a otro nuevo de regulación, escenario que complica enormemente la problemática abordada del control y minimización de emisiones de NO<sub>x</sub>.

## **2. OBJETO DEL PROYECTO "RENOX"**

El presente proyecto "Reducción de Emisiones de NO<sub>x</sub> en la Combustión de Carbones Antracitosos" ("RENOX"), de código C-21-378: tiene por objeto la minimización de emisiones de NO<sub>x</sub> generadas en calderas de arco quemando combustibles bajos en volátiles, sin perjudicar el consumo específico del grupo ni su disponibilidad, y aplicando únicamente medidas de ajuste de combustión, también llamadas primarias.

Su carácter impuso que se desarrollara en dos fases, correspondientes a otras tantas etapas lógicas: la Fase 1, asociada al proyecto RNA, de caracterización de las emisiones y combustión, modelización numérica compleja de los flujos dentro de caldera, y determinación de la viabilidad y alcance de la optimización de las emisiones. Y la fase 2, proyecto OPTINOX, que aprovecha la metodología y enseñanzas de la primera y, como continuación natural de ella, se dedica al diseño, desarrollo, fabricación y validación de un sistema informático que procesando datos en tiempo real de la caldera en arco quemando carbones antracitosos donde se instale, permita monitorizar, supervisar y controlar la operación comercial de dicha planta optimizando, aislada o conjuntamente, su rendimiento de combustión y las emisiones de NO<sub>x</sub>.

Simplificando, la finalidad de este proyecto se ha centrado en la consecución de un prototipo de demostración validado de un paquete de "software" ("OPTINOX") que permite determinar estrategias de operación y control capaces de minimizar las emisiones de NO<sub>x</sub> sin afectar

desfavorablemente al rendimiento y consumo específico de las unidades, basándose para ello en la optimización de la combustión puesta de manifiesto mediante campañas de caracterización del binomio caldera-combustible ("RNA").

### 3 PLANTEAMIENTO Y ORGANIZACIÓN

El proyecto RENOX fue concebido como un amplio programa experimental diseñado para la caracterización de combustión y su repercusión en la producción de  $\text{NO}_x$  de calderas de diferente tecnología, aunque todas diseñadas para quemar hullas y antracitas de bajo contenido en volátiles. Aun cuando su segunda fase se aplicó a una caldera en arco, su alcance de utilización fue ampliado, de modo que su aplicación se extendiese a la optimización de rendimiento y emisiones de cualquier tipo de caldera y combustible.

La primera fase del RENOX, proyecto RNA, está basado en pruebas de sensibilidad paramétrica a escala real, dirigidas a la búsqueda del conocimiento de los mecanismos de generación de las emisiones de  $\text{NO}_x$  generadas en las calderas de las C. T. Compostilla II, propiedad de ENDESA, S.A. De las cinco calderas de esta planta fueron seleccionadas para su análisis en profundidad las de los grupos 3, 4 y 5. Las tres son de diseño Foster-Wheeler, aunque con diferencias sustanciales entre el modelo instalado en los grupos 4 y 5 (gemelos), y la del grupo 3.

La segunda parte del RENOX, proyecto OPTINOX, ha sido desarrollado, instalado y validado en el grupo 3 de la citada C.T. Compostilla II.

El proyecto fue promovido por ENDESA, S.A, propietaria de dicha central térmica, contando con financiación parcial procedente de 3 organismos: el Coal Research Programme de la Comunidad Europea del Carbón y el Acero (CECA); OCIDE, gestora de fondos del programa P.I.E.; y OCICARBON, gestora de fondos provenientes principalmente del programa P.I.C.

En el proyecto RNA la ejecución del proyecto, en lo que se refiere a definición, alcance, apoyo técnico y de infraestructura a la realización de todas las actividades de naturaleza experimental, y evaluación de resultados, fue realizada por personal técnico de ENDESA, S.A perteneciente a distintas direcciones de esta empresa eléctrica. Estas mismas actividades, excluyendo las de apoyo citadas, fueron realizadas por la firma de ingeniería INERCO, S.A. que además, llevó a cabo las tareas de campo en todas las pruebas. Las actividades de modelización y simulación numérica mediante CFD,s fue encomendada al Area de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Zaragoza (LITEC), que contó en su quehacer con el apoyo de las dos empresas citadas anteriormente. La modelización geométrica de las calderas cuyo comportamiento fluidodinámico fue simulado fue responsabilidad de la sociedad Tecnología y Gestión de la Innovación, S.A.

En las tareas de desarrollo del OPTINOX participaron, con similar tipo de distribución de actividades que en la fase anterior, INERCO, S.A. y ENDESA, S.A.

Los trabajos de desarrollo del proyecto RENOX se iniciaron el uno de julio de 1993 y finalizaron el 31 de marzo de 2000. La distribución de este periodo entre las dos fases que lo componen es la siguiente: proyecto RNA, desde 1 de julio de 1993 hasta el 31 de marzo de 1997; proyecto OPTINOX, desde 1 de abril de 1993 hasta 31 de marzo de 2000.

## 4 Proyecto RENOX, fase 1: PROYECTO RNA

### 4.1 OBJETO

El objeto principal de la primera fase del RENOX, proyecto RNA, sobre "Reducción de las Emisiones de NO<sub>x</sub> en la Combustión de Carbones Antracitosos" es la determinación de las condiciones de combustión y sus variables de regulación asociadas que permiten obtener reducciones importantes de las emisiones de NO<sub>x</sub> en las centrales térmicas que utilizan como combustibles antracitas y hullas bajas en volátiles. O de otro modo, evaluar la capacidad de abatimiento de emisiones de óxidos nitrosos mediante medidas primarias.

Dentro de las medidas primarias, el proyecto contempla, preferentemente, las derivadas sólo del ajuste y la regulación de la combustión, aunque inicialmente también se incluyó la evaluación de posibles modificaciones en el diseño de los quemadores y de la zona de combustión del hogar.

Como objetivos secundarios, asociados a la consecución del objetivo principal descrito, se plantearon:

- El estudio en profundidad de los mecanismos de generación de los NO<sub>x</sub> en las condiciones particulares de la combustión industrial de antracitas y carbones bajos en volátiles.
- El desarrollo y validación, con datos reales, de modelos de simulación fluidodinámicos avanzados, capaces de describir y representar los fenómenos del campo fluido, intercambio de calor y combustión multifásica dentro del hogar.
- La identificación y evaluación de las mejores condiciones de operación de las centrales respecto a la minimización de las emisiones de NO<sub>x</sub>, siempre con una consideración especial hacia la estabilidad y seguridad de marcha de las calderas y hacia el rendimiento y consumo específico de los grupos termoeléctricos.
- La identificación del comportamiento diferencial de las calderas en función de su configuración constructiva, así como la extrapolación de aquellas variantes en el diseño y operación de diferentes unidades que determinan menores niveles de generación de NO<sub>x</sub>.

### 4.2 ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DE ACTIVIDADES.

Una de las características más significativas del presente proyecto es que sus resultados y conclusiones están basados en la realización de campañas experimentales en calderas de potencia industriales diseñadas para quemar carbones con bajo contenido en volátiles.

Las actividades desarrolladas pueden estructurarse, en función de su alcance y secuencia de realización, en los siguientes bloques genéricos:

- I) Actividades y **estudios previos**, que han comprendido, además de la definición de la estructura de ejecución y el desarrollo de aspectos organizativos, las siguientes actuaciones relevantes:

- Una exhaustiva revisión bibliográfica sobre la problemática de generación de  $\text{NO}_x$  en la combustión de antracitas.
- La caracterización, en base a históricos, de los combustibles y de las condiciones de operación de las calderas incluidas en el proyecto.
- La realización de contactos con otras centrales térmicas y con instituciones y expertos internacionales sobre la materia. Entre ellos las principales instalaciones experimentales sobre combustión existentes en el mundo.

II) **Campañas preliminares** de medida de emisiones en todas las calderas consideradas en el proyecto, incluyendo la puesta a punto de equipos y la elaboración de procedimientos de medida y ensayo.

Asimismo, se realizaron campañas de contraste de la instrumentación de caldera en los distintos grupos, para asegurar la validez, coherencia y suficiencia de los datos recabados durante las pruebas. También se produjo la especificación, compra y calibración de instrumentación analítica adicional, y se efectuaron los trabajos de preparación de las campañas de ensayos.

III) **Campaña de ensayos en el Grupo 4 de C.T. Compostilla**, seleccionado como grupo de referencia en base a sus altos niveles de emisión de  $\text{NO}_x$  y elevada producción eléctrica anual.

IV) **Pruebas en el Grupo 5 de la misma central**, gemelo del anterior, para determinar la influencia que una reducción del área de refractario instalada en su hogar tiene en la emisión de  $\text{NO}_x$ , y para contrastar la aplicación de las modificaciones operativas determinadas como óptimas en el Grupo 4.

V) **Campaña de ensayos en el Grupo 3 de C.T. Compostilla**, con objeto de estudiar las características de diseño y operación de este grupo que motivan sus menores niveles de generación de  $\text{NO}_x$ , con respecto a los típicos de los grupos 4 y 5.

En este contexto, y dado que, según se pondrá de manifiesto posteriormente, se ha identificado al distinto diseño del sistema de aporte de aire como el factor de mayor influencia en la diferente generación de  $\text{NO}_x$  de estos grupos, se acometió, adicionalmente, la modelización fluidodinámica de las cajas de viento de estas instalaciones. Estos desarrollos han permitido cuantificar los caudales y ratios de aporte de aire de cada grupo. Esta modelización fue realizada por INERCO, S.A.

VI) **Modelización geométrica y fluidodinámica y simulación numérica** de las calderas de los grupos 3 y 4 dedicada a la obtención de los campos fluidos, intercambios de calor y determinación de los productos de combustión gaseosos generados en zonas de hogar, principalmente  $\text{NO}_x$ .

- VII) **Evaluación de resultados y elaboración de recomendaciones operativas** para cada una de las instalaciones ensayadas, incluyendo las derivadas del análisis diferencial de las variantes tecnológicas y constructivas de las calderas.

#### 4.2.1 **Actividades y trabajos previos.**

Los estudios y trabajos previos a la realización de las campañas de ensayos y pruebas se centraron en los grupos 3, 4 y 5, con el alcance para cada grupo y actividad que imponía bien la calidad y fiabilidad de la medida asociada, bien la necesidad de caracterización inicial de flujos máxicos. Entre los mismos se encuentra un programa específico de Contraste de Instrumentación de las tres calderas, al objeto de contrastar y calibrar su instrumentación y verificar la calidad de las señales de los SAD (sistema de adquisición de datos).

Para la realización de las campañas de ensayo enunciadas se diseñó una metodología específica de planificación de pruebas, fundamentada en el análisis factorial de experimentos, así como procedimientos detallados de ejecución, seguimiento, monitorización y registro de los resultados de cada ensayo.

Entre otros trabajos previos y de adecuación de las instalaciones a las campañas de ensayos y pruebas, figuran:

- I) Selección de parámetros, puntos de muestreo y condiciones de operación.
- II) Contraste de analizadores de oxígeno en salida de caldera con evaluación del mallado existente.
- III) Calibración de los venturis y placas-orificio de aire primario y secundario.
- IV) Determinación de las correlaciones, para condiciones de funcionamiento típicas, de caudal de carbón/apertura de compuertas de aire primario para cada uno de los conductos de salida de quemadores mediante equipo Rotorprobe.
- V) Análisis granulométricos (tamizado y Coulter de finos) para las muestras de carbón a quemadores tomadas con equipo Rotorprobe (caracterización de molinos para condiciones de funcionamiento típicas).
- VI) Elaboración de protocolos de medida de temperaturas de hogar (pirómetro) y flujos de calor (flux-probe) y estudio de repetibilidad de las medidas.
- VII) Especificación y compra de instrumentación de análisis de gases, pirómetros ópticos, medidores en continuo de inquemados en ceniza, sondas de medida de caudal de aire primario y carbón, y otras.
- VII) Contrastes de analizadores multiparamétricos y equipos de medidas de gases en continuo.
- VIII) Elaboración de partes de operación específicos de las pruebas e introducción de variables adicionales de interés en el sistema PMW (Plant Monitoring Workstation).

- IX) Establecimiento del plan definitivo de pruebas, determinación del alcance de las tareas a ejecutar y elaboración de los formatos de seguimiento de los ensayos.
- X) Contrastes de analizadores multiparamétricos y equipos de medidas de gases en continuo.
- XI) Estudio y ejecución de orificios de muestreo en las paredes de agua del hogar para así posibilitar la medida zonal de composición de gases y temperaturas de combustión.
- XII) Desarrollo de aplicaciones software para control y supervisión "on line" de parámetros de operación y medidas de variables de proceso, así como de cálculo de rendimientos y contabilidad energética para el grupo 3.
- XIII) Estudio y aplicación de los resultados de la modelización fluidodinámica efectuada para las cajas de viento de ambas calderas, datos empleados en las modelizaciones matemáticas efectuadas justificativas de los resultados experimentales obtenidos.

A resaltar que como fruto de estas actuaciones, se dispuso: de una cuantificación suficientemente precisa de los caudales de alimentación a caldera y su distribución; de una especificación clara de todas aquellas variables que deben ser determinadas mediante métodos manuales durante las pruebas; y de metodologías definidas y probadas para efectuar dichas mediciones manuales.

#### 4.2.2 Definición y desarrollo de las campañas de medida en el grupo 4

Una vez finalizadas las tareas preliminares relacionadas en el apartado anterior, se acometió la realización de un amplio programa de pruebas en el grupo 4 de C.T. Compostilla. Se llevaron a cabo medidas en un total de 84 casos distintos de operación del grupo, habiéndose definido las mismas por aplicación de la metodología del análisis factorial de experimentos a las variables fundamentales que condicionan el proceso de combustión del carbón y, por tanto, la generación de  $\text{NO}_x$

La metodología de análisis factorial de experimentos aplicada en este proyecto, que permite optimizar el proceso de información, determinando el número mínimo de casos representativos del fenómeno multivariable estudiado, determinó que se plantaran las campañas de medida en los grupos ensayados en tres fases sucesivas (Figura 2):

- **Ensayos Paramétricos de Modificación de Condiciones de Operación:** conjunto base de pruebas, estructurado mediante una matriz de ensayos confeccionada a partir de las variables operativas preseleccionadas, que permite determinar la sensibilidad del comportamiento de la caldera frente a la variación de cada parámetro de manera independiente.
- **Pruebas de Confirmación de Tendencias:** consistentes en la repetición de ensayos significativos de la etapa anterior, tras un cierto período de tiempo, con la finalidad de discriminar el efecto real de las modificaciones de los parámetros operativos respecto del efecto asociado a cambios globales en el estado de la caldera (por ejemplo, en función de su grado de ensuciamiento).
- **Ensayos de Máxima Mejora:** pruebas finales basadas en la asociación de aquellas modificaciones de variables que tuvieron efecto positivo sobre la reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en las etapas anteriores. Su finalidad es evaluar los efectos aditivos de dichas

combinaciones de modificaciones de operación, con el objetivo de localizar el ajuste óptimo de las condiciones de combustión en la caldera.

La piedra angular de la campaña de pruebas definitivas la constituye la matriz de ensayos. Dicha matriz recoge el conjunto de variables de operación modificadas a lo largo de las pruebas y los valores (niveles) de cada variable ensayados.

El conjunto de parámetros de operación considerado genéricamente para la ejecución de las pruebas definitivas del Proyecto RNA es el siguiente:

- Variables externas (normalmente prefijadas o no modificables directamente por el operador):
  - Temperatura y humedad del aire ambiente.
  - Propiedades del carbón consumido.
  - Carga de operación (fue seleccionada como base la plena carga).
  - Ensuciamiento de hogar (salvo efecto de soplado).
- Variables dependientes (que representan el resultado final de las pruebas):
  - NO<sub>x</sub> producido.
  - Inquemados en cenizas y CO.
  - Rendimiento de caldera (consumo específico).
- Variables manipuladas (sobre las que se actúa durante las experiencias):
  - Caudal total de aire de combustión.
  - Quemadores activos.
  - Regulación de quemadores.
  - Reparto de quemadores.
  - Distribución del aire terciario en el hogar.
  - Temperatura del aire primario/carbón.
  - Carga de los molinos (granulometría del carbón).
  - Apoyo de las llamas con fueloil.
  - Soplado de hogar.

Este conjunto de variables manipuladas recoge todos aquellos parámetros que condicionan, al margen del efecto de las variables externas, el proceso de combustión en las calderas del tipo considerado y, más específicamente, la generación de los NO<sub>x</sub>, determinando, por consiguiente, la estructura global de la matriz de pruebas. Esta estructura de ensayos fue particularizada a las características y connotaciones específicas de la caldera en estudio. Así, para el grupo 4 de C.T. Compostilla se estableció, la siguiente matriz de ensayos efectiva:

- Exceso de oxígeno en salida de caldera ..... (4 niveles)
- Molinos (quemadores) fuera de servicio ..... (8 niveles)
- Reparto aire secundario/aire terciario ..... (3 niveles)
- Carga de molinos (granulometría del carbón) ..... (2 niveles)
- Distribución del aire secundario ..... (4 niveles)
- Temperatura del aire primario/carbón ..... (3 niveles)

- Apoyo de fueloil ..... (3 niveles)
- Regulación de quemadores:
  - . Apertura de desaireaciones ..... (2 niveles)
  - . Extensión de llama ..... (2 niveles)
- Escoriación del hogar (evaluada por alteración de secuencias de soplado y por distancia en tiempo desde el último soplado al período de ensayo) ..... (2 niveles)

Tanto las variables como los niveles seleccionados se corresponden con las posibilidades tecnológicas de operación de dicha caldera manteniendo la operación estable y segura de la misma. El detalle de los valores ensayados de cada nivel se recoge en la Figura 3. Para cada variable implicada se definió una condición base que representa su valor habitual a plena carga.

Una vez definida la matriz de ensayos se abordó la ejecución material de las campañas de pruebas, que implicó el establecimiento de las condiciones de operación prefijadas, la estabilización de la operación y el seguimiento del funcionamiento durante un período de varias horas, con realización de distintos tipos de determinaciones de parámetros. La relación de actividades llevadas a cabo es, básicamente, la siguiente (Figura 4):

0. Definición y alcance de la prueba.
1. Medidas de temperaturas y flujos de calor.
2. Análisis de gases en salida de caldera.
3. Análisis de gases por encima del arco de quemadores.
4. Análisis de gases en salida de electrofiltro.
5. Toma de muestras de cenizas y carbón.
6. Determinación de caudal y granulometría del carbón.
7. Medida de inquemados en continuo/toma de muestras de cenizas
8. Recopilación de partes de operación, grupos estadísticos y resultados del sistema de monitorización en continuo del rendimiento (PMW).

Además de los datos generados en cada una de las actividades definidas para cada prueba (niveles térmicos, concentración de gases, caudal y granulometría del carbón, etc.) se registró y estudió un elevado número de parámetros de operación del grupo, para el seguimiento y caracterización de su funcionamiento durante las mismas. El registro de estas variables se efectuó tanto en soporte papel como magnético. La recopilación de datos fue realizada en tres grandes bloques diferenciados:

#### *I) Partes de operación*

Dentro de este apartado se han recogido los partes correspondientes a los molinos en funcionamiento y posición de compuertas de aire de desaireaciones, secundario y terciario. Adicionalmente, se han registrado los posibles apoyos con combustibles líquidos (localización y caudal).

#### *II) Registro de grupos estadísticos en SAD.*

Se definieron un total de 5 grupos estadísticos de variables en el ordenador de control. Cada grupo estadístico contiene un total de 10 parámetros, habiéndose registrado las medias cincominutales de los mismos para la determinación de su variabilidad a lo largo de cada prueba.

### III) *Registro y cálculo por el Sistema PMW*

Dado que en el grupo 4 de C.T. Compostilla está implantado el sistema de seguimiento de la operación PMW (Plant Monitoring Workstation), se configuraron en el mismo 7 archivos para la recopilación de los datos correspondientes a un total de 121 variables. Dentro de estos parámetros se han incluido los 50 seleccionados en los grupos estadísticos, como respaldo ante la eventualidad de pérdida de datos. Adicionalmente, se registraron los valores de las variables significativas del ciclo agua-vapor, así como los rendimientos de los distintos equipos del grupo. En este sentido, cabe destacar que el entorno PMW incorpora una serie de rutinas para la realización de estas determinaciones.

De esta forma, además de constituir una copia de seguridad de los resultados más importantes de los ensayos, el sistema PMW aportó a las campañas, entre otros, los siguientes datos: rendimiento de caldera; consumo específico; caudal de atemperaciones al sobrecalentador.

#### 4.2.3 **Resultados de las pruebas en el grupo 4.**

Los resultados obtenidos respecto a las condiciones operativas más adecuadas para la reducción de  $\text{NO}_x$  en el grupo 4 de C.T. Compostilla se resumen en la Figura 5.

En esta figura, en la que sobre cada una de las barras representadas se especifica el porcentaje de emisión de  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) con respecto al caso base, pueden identificarse las siguientes condiciones de funcionamiento:

- I) Caso base inicial, asociado a lo que se ha definido como llama alta, con un nivel de referencia de  $1767 \text{ mg/Nm}^3$  (862 ppm) de  $\text{NO}_x$  (prueba 00).
- II) Optimización del posicionamiento de compuertas para tipología de llama alta, con una reducción en la formación de  $\text{NO}_x$  del 5%.
- III) Optimización del exceso de oxígeno de operación para tipología de llama alta (% $\text{O}_2$  elevado), con una disminución en la generación de  $\text{NO}_x$  del 8%.
- IV) Condición de mínima emisión de  $\text{NO}_x$  para llama alta, con soplado previo, posición de compuertas 1 y apoyo de  $7,0 \text{ Tm/h}$  de fueloil en el centro del hogar. Reducción en  $\text{NO}_x$  alcanzada: 21% con respecto al caso 00.
- V) Minimización de la generación de  $\text{NO}_x$  sin apoyo de fueloil, mediante el cambio de tipología de llama (llama baja) y establecimiento de un menor exceso de oxígeno de operación (en torno al 3%). Reducción alcanzada: 19%.
- VI) Condición general de mínima producción de  $\text{NO}_x$ , a través de la implantación de condiciones de llama baja, funcionamiento con exceso de oxígeno del 3% y apoyo de fueloil ( $7,0 \text{ Tm/h}$ ) en quemadores centrales.

Además de estos resultados, en el estudio llevado a cabo se puso de manifiesto la elevada importancia del nivel de escoriación del hogar en la generación de  $\text{NO}_x$ . En concreto, se han

registrado, para la condición base, variaciones en las emisiones de  $\text{NO}_x$  de hasta un 9,5% en un período de funcionamiento de 4 horas, debidas, exclusivamente, a un incremento en la escoriación del hogar.

Independientemente de los hechos anteriores, el análisis de los datos disponibles desde varios frentes, tanto a nivel local como global, permite establecer las siguientes conclusiones fundamentales en relación con los objetivos del Proyecto:

- a) Es posible reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$  por debajo del nivel de  $1300 \text{ mg/Nm}^3$ , que en un futuro podría ser aplicable a C.T. Compostilla, sin necesidad de recurrir a medidas secundarias del tipo de la reducción catalítica selectiva (SCR), con el consiguiente ahorro en costes de inversión, operación y mantenimiento.
- b) Las condiciones de operación identificadas como óptimas para la reducción de  $\text{NO}_x$  suponen, además, una mejora en los resultados de consumo específico del grupo, pudiendo evaluarse que su implantación determinaría un ahorro de, aproximadamente, 200 millones de pesetas al año.

#### 4.2.4 Actividades y resultados de las pruebas en el grupo 5

Una vez constatada en el grupo 4 de C.T. Compostilla la influencia crucial de los niveles térmicos de hogar sobre la generación de  $\text{NO}_x$ , tanto a través de variaciones en el exceso de oxígeno de operación, como en función del nivel de escoriación, se determinó el interés de reducir la extensión de la superficie de refractario en el Grupo 5 aprovechando su parada para revisión.

En este contexto se planificó una campaña de medidas compuesta de dos fases, una previa y otra posterior a la reducción de refractario.

En principio, el alcance de la modificación introducida en los refractarios (eliminación de un 9,2% del total) no se aprecia haber sido determinante de una significativa reducción de los niveles térmicos en hogar y, por consiguiente, de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , habiéndose constatado una disminución de, únicamente, un 5% de estas últimas.

De los resultados de las pruebas efectuadas se desprenden las siguientes conclusiones:

- I) La reducción de  $\text{NO}_x$  cuando se incrementa el exceso de oxígeno de operación (efecto de enfriamiento), observada para tipología de llama alta, pone de manifiesto la elevada importancia de los niveles térmicos en la generación de óxidos de nitrógeno para la caldera del grupo 5. En este sentido, cualquier medida tendente a la reducción de las temperaturas de hogar, como la disminución de la superficie de refractario, llevará asociada, para cualquier tipología de llama establecida, una reducción en la generación de  $\text{NO}_x$ .
- II) La implantación en el grupo 5 de las medidas primarias de reducción de  $\text{NO}_x$  ensayadas con éxito en el grupo 4 (llama baja, exceso de oxígeno bajo, apoyo de fueloil al centro de caldera) determina mejoras de hasta un 37%, con respecto al caso base de partida tras el cambio de refractario, obteniéndose niveles de emisión de  $\text{NO}_x$  inferiores al límite de  $1300 \text{ mg/Nm}^3$ , de posible aplicación futura en C.T. Compostilla.

## 4.2.5 Actividades en el grupo 3

### 4.2.5.1 Alcance y definición de las campañas de medida

Una vez caracterizada la generación de  $\text{NO}_x$  en los grupos 4 y 5 de C.T. Compostilla se contemplaba, dentro de la estructura del Proyecto RNA inicialmente prevista, la experimentación en combustores piloto mediante ensayos comparativos a escala. Como consecuencia de los avances alcanzados durante el desarrollo de esta fase inicial y de las conclusiones del informe "Definición de Ensayos en Planta Piloto. Selección Preliminar de Combustores", se consideró oportuno no abordar la citada experimentación a escala piloto, reemplazando los contenidos de las actividades dedicadas a su planteamiento y realización por otros conducentes a la experimentación sobre el grupo 3 de la C.T. Compostilla II.

En virtud de ello quedó fijada una nueva definición para dichas actividades: la ejecución de un plan de ensayos especializados en el grupo 3. El objetivo principal de esta actuación era concluir sobre las razones, tanto de índole tecnológica como operacionales, que justificaban la menor generación de  $\text{NO}_x$  en la caldera de este grupo respecto a las de los grupos 4 y 5 de la central, constatada en el estudio de históricos y en las medidas preliminares realizadas, de manera que pudiera plantearse la extensión de dichas condiciones para baja producción de  $\text{NO}_x$  a estos últimos.

La metodología de planeamiento y organización de la campaña de pruebas realizada en el grupo 3 es similar a la desarrollada en el grupo 4, aun cuando la matriz de ensayos fue particularizada a las características y connotaciones específicas de la caldera del primero. Las variables de regulación de operación consideradas fueron:

- Exceso de oxígeno en salida de caldera (4 niveles).
- Molinos fuera de servicio (6 niveles).
- Reparto aire secundario/aire terciario (3 niveles).
- Posición de clasificadores de molinos (granulometría del carbón) (3 niveles).
- Distribución del aire secundario (4 niveles).
- Apoyo de fueloil (3 niveles).
- Regulación de quemadores (extensión de llama) (2 niveles).
- Escoriación del hogar (evaluada por distancia en tiempo desde el último soplado al período de ensayo) (2 niveles).

### 4.2.5.2 Resultados fundamentales de las pruebas en el grupo 3.

En la Figura 6 se resumen los principales resultados obtenidos en cuanto a niveles de emisión (y reducción) de  $\text{NO}_x$  para distintas condiciones de operación de la caldera del grupo 3. En concreto se muestran los valores típicos de emisiones de  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) para las siguientes condiciones de funcionamiento:

- I) Caso base inicial para exceso de oxígeno habitual (4,60%), con un nivel de referencia de  $1198 \text{ mg/Nm}^3$  de  $\text{NO}_x$  inferior al posible límite de aplicación futura de  $1300 \text{ mg/Nm}^3$ .
- II) Optimización del molino no operativo, asociada en este caso a la parada del molino 3, y que, en general, se relaciona con la existencia de zonas, a nivel del arco de quemadores, con muy

baja producción de  $\text{NO}_x$  (baja concentración local de oxígeno). Con este tipo de medidas se obtiene una reducción máxima en emisiones de  $\text{NO}_x$  del 4%, constatándose, en estos casos, un empeoramiento de los resultados en inquemados y consumo específico.

- III) Aumento de la apertura de las compuertas de aire secundario con reajuste de la relación A.T. (ciclones)/A.T. (desaireaciones). Esta modificación determina reducciones en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , en el entorno del 3%, teniendo una incidencia igualmente positiva sobre la generación de inquemados y consumo específico del grupo, con disminuciones respectivas de, aproximadamente, 0,3 % y 30 kcal/kWh.
- IV) Aumento del aporte de aire secundario y disminución del correspondiente al aire terciario, tanto a ciclones como desaireaciones, lo cual provoca una reducción significativa, en el entorno del 10%, en la generación de óxidos de nitrógeno, para valores de consumo específico muy similares.
- V) Apoyo de fueloil de 3,0 Tm/h, obteniéndose reducciones de hasta un 16% cuando este combustible se aporta en los quemadores centrales; en este caso se constatan mejoras adicionales en el apartado de inquemados en cenizas.
- VI) Disminución del exceso de oxígeno de operación hasta un 3%, lo cual determina reducciones en las emisiones de  $\text{NO}_x$  de hasta un 27%. Este tipo de modificación es la que, con diferencia, tiene una mayor relevancia en la disminución de la generación de  $\text{NO}_x$ , tanto por el grado de reducción alcanzado como por las posibles mejoras en consumo específico. No obstante, su aplicación en las condiciones del grupo durante las pruebas ha estado limitada, en general, por la creación de zonas puntuales con muy baja concentración local de oxígeno, determinantes de una importante penalización en la producción de inquemados. Este hecho ha condicionado que, en ciertos casos, el efecto neto de esta variación operativa sobre el consumo específico del grupo sea negativa.

Además de estas modificaciones en las rutinas de operación habituales, se ha contrastado la influencia de un aumento de la relación aire terciario/aire secundario, observándose una importante reducción de inquemados, que se traduce en mejoras tanto del rendimiento de caldera como del consumo específico del grupo. Dentro de este último aspecto, no debe descartarse tampoco un cierto efecto positivo derivado de la creación de una tipología de llama más baja (menor caudal de atemperaciones).

No obstante lo indicado, cabe resaltar que, según se pone de manifiesto en la Figura 6 (a la izquierda del caso base 01), el aumento del ratio A.T./A.S. determina, para las condiciones específicas actuales del grupo 3, un incremento de las emisiones de  $\text{NO}_x$  cercano al 40% que, sin embargo, para algunos casos intermedios, no supone el incumplimiento del posible límite de aplicación futura de  $1300 \text{ mg/Nm}^3$  de  $\text{NO}_x$ .

Pueden establecerse las siguientes conclusiones finales de las pruebas en el grupo 3:

- I) Las características específicas del grupo 3 hacen que, en la práctica totalidad de casos ensayados, sus emisiones de  $\text{NO}_x$  sean inferiores al límite de  $1300 \text{ mg/Nm}^3$  de posible aplicación futura, alcanzándose valores inferiores, incluso, a  $900 \text{ mg/Nm}^3$  (prueba con reducción del exceso de oxígeno de operación al 3%).

- II) Es posible optimizar simultáneamente en el grupo 3 los parámetros de emisiones de  $\text{NO}_x$  y consumo específico, a través de medidas como la reducción del exceso de oxígeno de operación, el ajuste de la relación A.T./A.S., o el apoyo de fueloil.

No obstante este resultado, en general las técnicas de máxima disminución de emisiones de  $\text{NO}_x$  no coinciden con aquellas que determinan una menor generación de inquemados. En este sentido, modificaciones en la tipología de las llamas (mayor intercambio de calor en zona inferior del hogar y reducción en caudal de atemperaciones) pueden condicionar la obtención de consumos específicos similares, o incluso inferiores, en casos con menores emisiones de  $\text{NO}_x$  y mayores niveles de inquemados.

- III) La parada de un molino que aporte a quemadores más extremos, como sucede habitualmente con la puesta fuera de servicio del molino 1, no penaliza significativamente las emisiones de  $\text{NO}_x$ , a diferencia de lo observado en el Grupo 4.
- IV) Las medidas implantadas que han tenido como consecuencia la creación de un mayor desequilibrio a nivel del arco de quemadores, pese a tener una incidencia positiva sobre la generación de  $\text{NO}_x$ , incrementan de manera muy importante la producción de inquemados y, por ende, el consumo específico del grupo.
- V) El apoyo de fueloil, fundamentalmente en quemadores centrales, determina reducciones muy significativas en la generación de  $\text{NO}_x$ , con mejoras adicionales en el apartado de inquemados en cenizas.

#### 4.2.6 Actividades de modelización fluidodinámica (CFDs)

Las actividades de modelización fluidodinámica computacional (CFD en inglés) y simulación numérica representan un importante capítulo en las tareas que contemplaba el RENOX, toda vez que estas herramientas son de reconocida gran ayuda a la hora de simular el comportamiento de sistemas muy complejos, como es el caso, extremo, de las calderas de potencia que aquí se estudiaron, no sólo por sus escalas y geometrías, sino también por el elevado número y complejidad de sus elementos de regulación unido a dificultad de modelizar los procesos de combustión que tienen lugar en ellas.

Los modelos que aquí se construyeron y posteriormente validaron mediante la contrastación de sus resultados con los datos reales obtenidos en la tomas de valores de la planta (manuales y automáticos) tuvieron y tienen las siguientes aplicaciones:

- Verificar y apoyar los modelos matemáticos construidos (correlaciones multivariable) así como los resultados experimentales medidos y las tendencias de comportamiento en el transcurso de las campañas de ensayos.
- Proporcionar una completa "radiografía" de los parámetros del campo fluido (velocidades, presiones, temperaturas), del intercambio térmico entre gases y elementos de caldera y su sistema de combustión; y de la formación y evolución de los productos gaseosos (típicamente  $\text{NO}_x$ ) en el interior del hogar, para cualquier posición de operación y "mix" de combustible alimentando la caldera. En suma, permitir construir y operar lo que se denomina "una caldera virtual".

- Permiten el estudio de repercusión en los parámetros de eficiencia de cualquier modificación en su diseño, en el sistema de combustión, ante el cambio de combustible o de los parámetros de combustión: estequiometrias y ratios entre aires, distintos excesos de oxígeno en salida de gases, etc., apoyando la definición de las estrategias de operación más adecuadas a cada escenario de operación concreto.

Las actividades de modelización geométrica fueron realizadas, junto con el programa interfaz de usuario, por la firma TGI, S.A, antes mencionada. La modelización fluidodinámica y simulación numérica fue realizada por LITEC. Los aspectos más reseñables de esta tarea son los siguientes:

- Se modelizaron las zonas de hogar de los dos modelos de caldera estudiados: el del grupo 3; y el común a los grupos 4 y 5.
- Se desarrollaron dos modelizaciones y simulaciones: bidimensional (o 2D), atendiendo a la conocida (y observada experimentalmente) simetría de flujos de gases; y tridimensional (o 3D) que permitía una mayor precisión en zonas extremas, así como una mejor definición de condiciones de contorno.
- El modelo de cálculo empleado para la formación de carbón y formación de NO<sub>x</sub> está basado en el método Euleriano-Euleriano, no en el más habitual Lagrangiano-Euleriano estando ello debido, entre otros aspectos, a la complicación geométrica de estas calderas de arco, con lo que ello supone en términos de recursos de cálculo.
- Dicho modelo utiliza ecuaciones de conservación eulerianas para la fracción volumétrica de cada una de las fases, así como para las medias locales de cada propiedad (como velocidad, temperatura o composición) en cada una de las fases. Una formulación cuidadosa permitió la consideración de cuatro componentes en la partícula de carbón (agua, carbón bruto, carbón fijo (char) y ceniza). La selección adecuada de los términos de intercambio interfases permitió la precisa modelización de todos los procesos que experimenta el combustible, que incluyen: calentamiento, secado, pirólisis y combustión heterogénea.
- Las ecuaciones que constituyen el modelo matemático, junto con sus correspondientes condiciones de contorno, fueron codificadas en el código de Mecánica de Fluidos Computacional PHOENICS. Este código utiliza una discretización por volúmenes finitos y el esquema IPSA para la resolución acoplada de presión velocidad y fracciones volumétricas.
- Se modelizó y simuló el campo fluido, intercambio de calor y formación de productos gaseosos en el proceso de combustión. El modelo fluidodinámico utilizado incluye un post-procesador para el cálculo del NO<sub>x</sub> generado. Considera para ello la generación de estos por vía térmica y la debida al contenido en N del combustible, y su destrucción mediante mecanismos de reducción homogénea y heterogénea.

Como se ha indicado, los modelos fueron validados con los datos reales medidos en planta. La utilidad de los modelos en el devenir del proyecto fue muy importante, toda vez que ayudaron a corroborar los resultados obtenidos y las recomendaciones de operación que surgieron a raíz de este proyecto, las cuales se encuentran aplicadas en los procedimientos de operación hoy vigentes. Los modelos CFD desarrollados permitieron, igualmente, ajustar el rango de variabilidad de aquellas

variables de la matriz de ensayos que tenían una menor "sensibilidad" en cuanto al comportamiento en emisiones de las calderas consideradas.

Las predicciones de comportamiento de las calderas que se obtuvieron con estas modelizaciones, en valores cuantitativos y cualitativos o tendenciales son muy razonables, habiendo sido utilizada esta capacidad para estudiar y confirmar tanto los resultados y recomendaciones aportados por este proyecto, cuyo resumen se expresa en este informe, como para otras iniciativas y proyectos relacionados con la mejora de explotación de la central, principalmente operando en condiciones de bajo NO<sub>x</sub>.

Un resumen de esta parte del proyecto y de los resultados obtenidos se puede encontrar en varias referencias. Una de ellas es: Fueyo N, Gambón V, Dopazo C, González JF (1999): "Computational evaluation of low-NO<sub>x</sub> operating conditions in arch-fired boilers", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121, No 4, pp735-740, 1999. En la Figura 7 se representan algunos resultados de la modelización fluidodinámica efectuada para el grupo 4.

#### 4.2.7 Comparación de resultados del grupo 3 y grupos 4 y 5

En la Figura 8 se cuantifican las diferencias existentes en cuanto a formación de NO<sub>x</sub> versus exceso de oxígeno en salida de gases para los tres grupos de C.T. Compostilla ensayados, y en las siguientes condiciones de operación:

- I) Grupo 4: condiciones de llama alta (A.T./A.S. bajo) y llama baja (A.T./A.S. alto).
- II) Grupo 5: condiciones de llama alta (A.T./A.S. bajo) y llama baja (A.T./A.S. alto).
- III) Grupo 3: condiciones base, A.T./A.S. alto y A.T./A.S. bajo.

Esta figura pone de manifiesto la similitud existente entre las curvas de regresión de los grupos 4 y 5, tanto para tipología de llama alta como de llama baja, así como el parecido de las tendencias de las regresiones del grupo 3 y las asociadas a llama baja para los grupos 4 y 5, aún cuando estas últimas se sitúan claramente por encima (unos 500 mg/Nm<sup>3</sup>).

Adicionalmente, cabe destacar que un aumento de la relación A.T./A.S. supone, para los excesos de oxígeno habitualmente empleados (4,0-4,5%), una reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> en los grupos 4 y 5 (evolución de llama alta a baja), mientras que, para el caso del Grupo 3, por el contrario, se produce un aumento de las mismas.

En la Figura 9 se recogen las curvas de regresión NO<sub>x</sub>/O<sub>2</sub>, obtenidas para el centro del arco de quemadores (pared con todos sus molinos operativos), en las pruebas más significativas llevadas a cabo en los grupos 3 y 4 (las correspondientes al grupo 5 son muy similares a las del grupo 4).

Asimismo, en la Figura 10, se muestran las curvas de regresión CO/O<sub>2</sub> en esta misma zona, para el caso base seleccionado de llama baja del grupo 4 y el caso base de las pruebas desarrolladas en el grupo 3.

Por otra parte, en la Tabla 1 se presentan los valores de temperaturas medias en distintas zonas del hogar, así como los resultados obtenidos en cuanto a desequilibrios de oxígeno entre paredes frontal y trasera (identificativos de un distinto reparto aire/carbón entre paredes).

Las conclusiones más importantes que pueden extraerse, tras el análisis comparativo de los resultados obtenidos en estos grupos son los siguientes:

- I) Las concentraciones de  $\text{NO}_x$  a nivel del arco de quemadores son significativamente superiores en el grupo 4 para excesos de oxígeno similares.
- II) Las tendencias  $\text{NO}_x/\text{O}_2$  en los rangos donde existen medidas son directas para los casos base y relación A.T./A.S. alta del grupo 3 y de llama baja (A.T./A.S. alto) del grupo 4. Por el contrario, estas tendencias son inversas para las pruebas de A.T./A.S. bajo de los grupos 3 y 4 (llama alta en este último caso).
- III) Las curvas  $\text{CO}/\text{O}_2$  en arco de quemadores son muy similares en los casos considerados de los grupos 3 y 4.
- IV) Los niveles de oxígeno en la zona central del arco de quemadores de la pared con todos los molinos operativos (Figuras 8 y 9) son, en general, inferiores para el grupo 3, constatándose, además, desequilibrios entre paredes muy importantes en el caso base de este grupo. Este hecho determina que los valores asociados de CO en esta región sean, para esta prueba, significativamente más altos.
- V) Para ambos grupos, un incremento de la relación aire terciario/secundario determina una bajada de las llamas, lo cual puede constatarse por la reducción en el caudal de atemperación y la menor temperatura relativa medida en el nivel superior del hogar (en el caso del grupo 3 se observa, adicionalmente, un aumento de la temperatura en la zona del hogar próxima al cenicero)
- VI) Las temperaturas en las zonas inferior, fundamentalmente, e intermedia del hogar son superiores para las pruebas consideradas del grupo 4. No obstante estas diferencias son mínimas cuando se comparan ensayos con similares excesos de oxígeno en caldera. Asimismo, los niveles térmicos en el resto de zonas del hogar, incluyendo la inmediatamente superior al arco de quemadores, se encuentran comprendidos dentro de un rango de variación similar.
- VII) En los casos seleccionados no se aprecian diferencias significativas, para ambos grupos, en las variaciones de temperaturas existentes entre el centro y los laterales del arco de quemadores. No obstante, para el grupo 3, los niveles de temperaturas en el arco de quemadores son más uniformes.
- VIII) La temperatura del aire secundario es, en términos medios, unos  $25^\circ\text{C}$  mayor en el Grupo 4, no encontrándose diferencias significativas en lo que respecta a la temperatura del aire primario en salida de molinos.

#### 4.2.8 Elaboración de recomendaciones operativas

Tras los extensos estudios efectuados sobre los datos provenientes de los ensayos realizados en las en las tres fases de las campañas de pruebas paramétricas en campo; el análisis de históricos de la operación de cada grupo; la información y supervisión aportada por el personal técnico de la C.T. Compostilla; los resultados y predicciones aportados por los CFDs; y las pruebas de larga duración para corroboración que realizó la planta, se llegó a la posesión de una base de

conocimiento sobre cómo minimizar las emisiones de NO<sub>x</sub> de cada grupo sin o con una merma aceptable de rendimiento empleando sólo medidas primarias, también llamadas de ajustes o "afino" de combustión.

Tal base de conocimiento y herramientas de diagnóstico (CFD) sirvieron para la redacción de nuevas recomendaciones de operación aplicables a distintos escenarios de carga y condiciones de emisión, particularmente en aquellas donde se prima la baja emisión de NO<sub>x</sub>. Entre estas recomendaciones figuran:

- La implantación de tipologías de llamas "bajas".
- Distribuciones distintas de los aportes de aire en función de la tipología de llama.
- Funcionamiento con molinos distintos a los empleados en condiciones de mínimo técnico.
- Vigilancia de desequilibrios de hogar por escoriaciones localizadas.
- Actuación prioritaria de sopladores del nivel inferior de paredes de agua.

## 5. Proyecto RENOX, Fase 2: PROYECTO OPTINOX.

### 5.1 OBJETIVO

Una vez finalizada la primera parte del proyecto RENOX, donde se puso de manifiesto la posibilidad real de reducir en un amplio margen la emisión de NO<sub>x</sub> en calderas de arco quemando antracitas mediante el ajuste de los parámetros de combustión, se acometió el desarrollo de la segunda parte de aquel proyecto, denominado proyecto OPTINOX, cuyo objetivo es el diseño, desarrollo y validación de un sistema informático que procesando datos en tiempo real de la central térmica donde se instale, permita monitorizar, supervisar y controlar la operación comercial de dicha planta optimizando, aislada o conjuntamente, su rendimiento de combustión y las emisiones de NO<sub>x</sub>.

La justificación de esta segunda fase del proyecto RENOX hay que buscarla, aparte de en la viabilidad de alcanzar los resultados pretendidos, como fue puesto de manifiesto en la fase previa, en la asunción del hecho de que sin un sistema de supervisión y optimización como el desarrollado es muy difícil que el operador pueda optimizar al máximo y de en continuo la operación de cualquier caldera de potencia de esta capacidad, habida cuenta, entre otros factores, de su dinámica (ensuciamiento y escoriación, y variación en el combustible) y complejidad (elevado número de elementos de regulación actuantes).

Simplificando, la finalidad de este proyecto se ha centrado en la consecución de un prototipo de demostración validado en planta de un paquete de "software" que permite determinar estrategias de operación y control capaces de minimizar las emisiones de NO<sub>x</sub> sin afectar desfavorablemente al rendimiento y consumo específico de las unidades cuya explotación supervise.

La ejecución del proyecto OPTINOX se particularizó para el grupo 3 la C.T. Compostilla II, de 330 MWe, habida cuenta de que su mayor grado de instrumentación respecto de la de los otros grupos, beneficiosa para la eficacia y economía del proyecto, así lo aconsejaba. Por otro lado, Un aspecto fundamental contemplado en el diseño de este proyecto es su relativamente fácil e inmediata aplicabilidad a cualquier otra central térmica, independientemente de su tipo de caldera y del combustible que queme. En la Figura 11 se indican las tareas principales que hubo que cumplimentar para alcanzar el desarrollo previsto en el OPTINOX, fueron:

- I) Del aumento y mejora de las prestaciones del sistema de monitorización del grupo 3, para que de ese modo pudiera facilitar al OPTINOX los datos necesarios de la operación de la planta con la calidad requerida. Esta operación implicó la instalación de nueva instrumentación de supervisión de parámetros de caldera, así como el desarrollo de un sistema de aseguramiento de la calidad de todas las señales de instrumentación alimentando al sistema.
- II) La definición y el desarrollo de modelos de simulación y programas informáticos de cálculo que permitieran tanto la evaluación del funcionamiento de la caldera como la correlación entre su rendimiento y las emisiones esperables de NOx.
- III) La integración de los citados modelos y programas para que constituyesen un sistema que recibe y procesa los datos de operación de la planta y determina estrategias óptimas de operación de la misma, según instrucciones ordenadas por el personal técnico de la central.
- IV) La instalación del sistema, pruebas, puesta a punto y su validación en planta.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El sistema OPTINOX para apoyo a la operación de centrales térmicas donde se quema carbón con bajo contenido en volátiles, es un sistema avanzado "on-line" de supervisión, predicción y optimización del rendimiento de combustión y emisión de NOx que se puede caracterizar por:

- I) Ser un sistema abierto, que permite supervisar y optimizar la operación de calderas de distintas tecnologías, quemando cualquier tipo de carbón o mezcla y operando en distintos escenarios de carga.
- II) Ser un sistema que permite el seguimiento "on-line" de la fiabilidad de los modelos que utiliza, mediante el cálculo en continuo de índices de fiabilidad e incertidumbre que advierten al usuario de la bondad e idoneidad del modelo utilizado en cada momento, así como de la necesidad de realizar pruebas adicionales para su reentrenamiento, y los criterios para realizarlas.
- III) Ser fácilmente reentrenable, pudiendo ser esta función activada: de forma: automática; tras petición de usuario; o semiautomática, en función de las recomendaciones de éste.
- IV) Utilizar algoritmos matemáticos y programas informáticos de última generación, como son: redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica borrosa; y ORACLE y sistema operativo Windows NT.
- V) Ser un sistema fácilmente portable a otros grupos, no requiriéndose ningún trabajo adicional de programación, sino exclusivamente de análisis y entrenamiento.
- VI) A diferencia de otros sistemas existentes en el mercado, el sistema se desarrolla sobre la premisa de un profundo conocimiento previo sobre cómo optimizar la caldera, indispensable para el adecuado funcionamiento del modelo.

- VII). Igualmente, a diferencia de otros desarrollos, el OPTINOX se basa en una adecuada monitorización avanzada de hogar, que permite caracterizar, por ejemplo, la tipología de llama mediante la medida de la concentración de determinados gases de combustión en zonas de influencia de quemadores o los desequilibrios en caldera, información que puede ser suministrada, p. ej., por el sistema automático de monitorización de gases de combustión en el interior del hogar denominado OPTICOM.

### 5.3 DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema OPTINOX está organizado en dos niveles claramente diferenciados, según aparece en la Figura 12, que son:

- **Estructura base**, constituida por los siguientes componentes:
  - Sistema de Aseguramiento de Calidad de Señales.
  - Sistema de Cálculo.
  - Módulo de Contabilidad Energética.
  - Sistema Base de Gestión.
  - Interfaz de Usuario.
  
- **Módulos adicionales**, donde radican y corren los modelos y algoritmos de predicción y optimización. El sistema OPTINOX integra dos módulos adicionales:
  - Subsistema Experto de Malfunciones de Combustión.
  - Módulo de Optimización Conjunta de NO<sub>x</sub> y Rendimiento.

El Módulo de Optimización Conjunta de NO<sub>x</sub> y Rendimiento presenta una estructura constituida por un subsistema experto (binario o difuso, en función de las necesidades del sistema), otro predictivo con posibilidad de actualización (red neuronal) y, finalmente, un modelo de optimización (algoritmo genético). Este esquema permite establecer recomendaciones de operación para optimizar rendimiento y NO<sub>x</sub> a partir de datos históricos del grupo con una elevada potencia de localización de la solución óptima, sobre todo para problemáticas complejas, como son las que están implícitas en estos procesos de combustión.

Dispone de capacidad de autoentrenarse de forma automática, y se ha diseñado con los siguientes módulos básicos, representados en la Figura 13:

1. Módulo de Adecuación de la Información, prepara la información recibida por el sistema. Las variables que maneja el OPTINOX aparecen en dicha Figura 13.
2. Módulo de Inferencia de Optimización, para controlar el proceso de optimización y la validez de los resultados obtenidos.
3. Algoritmo Genético, para optimización.
4. Red Neuronal, dedicada a la función predictiva.
5. Sistema Experto para Actualización de la Red Neuronal, compuesto por un Módulo de

Inferencia de Actualización y un Módulo de Aprendizaje, encargados de evaluar la necesidad de iniciar los procesos de aprendizaje y llevarlos a cabo.

El sistema avanzado de monitorización y predicción así organizado, dispone de tres funciones distintas, seleccionables por los potenciales usuarios de la central térmica, según un orden de jerarquía materializado mediante claves de acceso:

- **Optimización.** (Figura 14): el sistema determina, para las variables seleccionadas por el usuario, de entre un conjunto de ellas, las condiciones operativas más adecuadas para obtener valores óptimos de rendimiento, NOx o la combinación de ambos.
- **Predicción.** (Figura 15): predice el rendimiento y la emisión de NOx que habría para unas condiciones operativas propuestas por el usuario.
- **Actualización.** (Figura 16): permite chequear, de forma automática, la validez de los resultados que da el sistema, así como su reentrenamiento de forma automática.

Además de los módulos citados, y dado que la limpieza de los bancos de hogar influye de forma importante en el rendimiento de la caldera, al sistema OPTINOX se le añadió un módulo de soplado que permite el seguimiento y optimización del proceso de soplado de la caldera, aconsejando al operador, en tiempo real, sobre la conveniencia de soplar. Este módulo, junto con el correspondiente al sistema de muestreo zonal de gases en el interior del hogar, OPTICOM, así como el de cualquier otro sistema que pudiera instalarse para monitorizar desequilibrios de combustión, está integrado funcionalmente en el bloque del Sistema Experto de Malfunciones de Combustión. Este módulo de soplado, dispone, además, de la posibilidad de actuar "off-line" como elemento de consulta para la mejor operación de la caldera.

Para implementar el sistema OPTINOX en la sala de control del citado grupo 3, se adquirió un ordenador con las siguientes características:

- Intel Pentium II, 333 Mhz.
- Placa Base con bus a 100 Mhz.
- 256 Mb SDRAM.
- 4Gb de disco duro SCSI.
- Tarjeta(s) de red de alta velocidad (100 Mb/s), 3 com fast etherlink 309X.
- Pila TCP/IP para conexión distribuida de clientes de 32 bits.
- Monitor 14", color, con tarjeta de resolución SVGA 800 x 600, 256 colores.

El ordenador está provisto de sistema operativo Windows NT server 4.0, service pack 3. Como software auxiliar se dispone de la licencia de "Oracle Server Enterprise".

## 5.4 ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DE ACTIVIDADES

El conjunto de trabajos y actividades desarrollados hasta terminar el proyecto OPTINOX puede agruparse en las cuatro fases principales de desarrollo que se indican en el diagrama de bloques que aparece en la figura 11, representadas en su secuencia temporal de ejecución. Son las siguientes:

1. **Fase 1.** Aseguramiento de la calidad de las señales de operación críticas para la fiabilidad de los resultados del sistema. Se aplica a los valores aportados por la totalidad de las señales directas y calculadas que entran al sistema, tanto provenientes del SAD de la planta como generadas por el programa PMW ("Plant Monitoring Workstation").
2. **Fase 2.** Definición y compra de nueva instrumentación necesaria para completar las entradas de datos que precisan los modelos matemáticos implementados en el sistema.
3. **Fase 3.** Diseño y desarrollo de los modelos de cálculo integrados en el sistema OPTINOX, así como de los algoritmos de cálculo, programas e interfaces de usuario.
4. **Fase 4.** Instalación, puesta a punto y validación del sistema en planta.

A continuación se hace una breve descripción de las principales actividades e hitos del proyecto, haciendo referencia a los aspectos más relevantes de los mismos.

#### 5.4.1 Fase 1: aseguramiento de la calidad de señales

Tras un estudio de las características, estructura y funcionamiento del Sistema de Adquisición de Datos (SAD) y del sistema PMW existentes, se localizaron las señales críticas de operación mediante un análisis de sensibilidad que tuvo en cuenta, de un lado, los requisitos de fiabilidad y precisión demandables a las variables que, provenientes del SAD, participan en los cálculos de rendimiento y consumo específico que realiza en continuo el PMW. Del otro, los de aquellas generadas por el propio PMW.

En función de estos resultados y conclusiones y de su particularización al conjunto de medidas existentes en el grupo 3, se establecieron las reglas y análisis de validación de las señales críticas seleccionadas. La validación se resuelve con la aplicación de dos criterios distintos y complementarios:

1. Validación estadística por origen, en la que se comparan los valores de las señales críticas con los registrados en diferentes periodos históricos y se cuantifican las relaciones existentes entre las diferentes señales.
2. Validación por coherencia, que consiste en el análisis de validez de las señales críticas en función del grado de cumplimiento de los balances y relaciones físicas y termodinámicas que las ligan con otras variables medidas del ciclo y del hogar.

#### 5.4.2 Fase 2: implantación de instrumentación adicional de planta

La ejecución de esta fase supuso cumplimentar tres tareas: definición de nuevas instrumentación, su especificación; y compra.

## 2.1 Definición de nuevas señales

La determinación de la nueva instrumentación de planta necesaria para aportar al sistema los valores de variables de proceso demandados por sus modelos se realizó tomando en consideración los siguientes elementos:

- Instrumentación disponible en la caldera del Grupo 3 de C.T. Compostilla II.
- Estructura de dicha instrumentación en el sistema de control y monitorización actual.
- Necesidad de instrumentación adicional y complementaria para el sistema OPTINOX.
- Potencialidad de expansión del sistema de supervisión de caldera y del sistema de cálculo (PMW).
- Viabilidad/disponibilidad de que la instrumentación existente contara con las características técnicas requeridas.

Brevemente, los resultados obtenidos se pueden resumir en la necesidad de especificar, adquirir e instalar en planta la siguiente instrumentación:

1. Sonda refrigerada. Definición de una sonda automática refrigerada para su inserción dentro del hogar y el muestreo zonal de gases en las inmediaciones de las paredes de caldera situadas encima del arco de quemadores.
2. Medida de inquemados en salida caldera. Se determinó la necesidad de instalar 6 sondas por conducto de salida (2 por caldera) a una profundidad que posibilitara obtener una medida representativa. Cada sonda permite determinar inquemados, SO<sub>2</sub>, NO y O<sub>2</sub> en gases, sirviendo para muestrear la combustión de un par de quemadores aguas arriba en el flujo de gases de combustión.
3. Medida de la temperatura de gases en zona de recuperación de calor, y otras medidas en hogar. Se analizaron las carencias que en cuanto a instrumentación existían en la central.

## 2.2 Actividad 2: especificación de nueva instrumentación

Comprendió dos tareas: especificación de instrumentación comercial y de otra nueva a desarrollar por necesidades específicas de este proyecto.

1. Instrumentación comercial. Se realizó un análisis técnico de la siguiente instrumentación:
  - Medidores de temperatura: pirómetros y termopares
  - Medidores de caudal: placa orificio, vortex, vcone, pitot, venturi, tobera, vatímetro, turbina, electromagnético, ultrasónico, másico de efecto Coriolis, y másico de efecto térmico.

2. Sondas específicas a desarrollar por Ingeniería. Se realizó un estudio detallado de las distintas opciones admisibles para el sistema de monitorización local de gases de combustión, una de las opciones posibles de aporte de parte de las variables variables de combustión que procesa el subsistema experto de malfunciones de combustión. Se decidió que las sondas específicas a diseñar y fabricar tuvieran las siguientes características:

- Extraíbles
- Sonda de paso simple con ranura en la zona superior, o de doble paso
- Fabricación de la sonda en acero inoxidable 316
- Refrigeradas por agua
- Longitud de la sonda entre 0,5 y 3 m, recomendándose, en principio, la de 1,5 m por ser la empleada para el muestreo manual
- Empleo de un cilindro neumático para el movimiento de la sonda.
- Limpieza combinada neumática y mecánica
- Ausencia de simultaneidad del soplado con la toma de muestra en otra sonda
- Empleo de 2 analizadores sin dilución de muestra
- Utilización para el sistema de control de un autómatas programable y un PC supervisor.

El desarrollo de la sonda así especificada, y la posterior construcción y montaje del sistema donde la misma se integra, que fue instalado en el grupo 3 de la central térmica de Compostilla, estando hoy funcionando a pleno rendimiento (desde marzo del 2000), se efectuó dentro de las actividades de otro proyecto CECA: el ECSC 7220-ED-096, "OPTICOM", que se lleva actualmente a cabo también en el Grupo 3 de C.T. Compostilla.

### **2.3 Actividad 3: adquisición de nueva instrumentación comercial**

Se finalizaron las tres tareas que comprendía: estudio de mercado; selección y compra de instrumentación; e implantación, puesta a punto y validación.

En la primera de estas tareas se realizó el estudio de mercado de los equipos definidos en base a la aprobación de la lista definitiva de señales de medida de variables de planta necesarias.

Las señales a medir se clasificaron en función del nivel de importancia que tienen desde el punto de vista del proyecto y de la operación, quedando como sigue:

- Nivel 1. Medidas fundamentales para los cálculos.
- Nivel 2. Medidas fundamentales para asegurar la validez de otras señales.
- Nivel 3. Medidas que pueden ser utilizadas también como de respaldo para asegurar la validez de otras señales.

Adoptando estos criterios, se estableció como imprescindible instalar la instrumentación del Nivel 1, muy importante la del Nivel 2 y aconsejable la del Nivel 3.

En el nivel 1 quedaron:

- Medida de temperatura en los colectores de entrada al sobrecalentador primario. Se recomendó el uso de termopares convencionales siempre que soportasen las temperaturas de la línea (tipo E o J).

- Medidores de caudal de vapor de soplado a precalentadores y a retráctiles (2 medidores) y de caudal de la purga continua de calderín (1 medidor). En la preselección de técnicas de medida de caudal se adoptó como equipo más adecuado para estas determinaciones la placa orificio, que genera una pérdida de presión superior, circunstancia que se ve compensada por un coste económico inferior.
- Circuitos de medida de intensidad de los principales equipos eléctricos, a realizar por el personal de instrumentación de la central.

En el nivel 2 quedaron encuadrados:

- Medida de gases en la zona posterior al sobrecalentador final y temperatura de gases en la salida del hogar, antes del sobrecalentador radiante. La más adecuada desde el punto de vista económico, de la precisión y de la eficacia es la de espectro infrarrojo de dos colores y con sensor de silicio, finalmente seleccionada.
- Medida de revoluciones de alimentador. Para la aplicación concreta que se estudió se consideró el criterio precio como determinante y se propuso un medidor de tipo inductivo.

Y en el nivel 3:

- Medidas de temperatura en hogar (arco de quemadores). Para su realización se evaluó como más idóneo un pirómetro IR de doble línea de última generación.
- Medida de caudal de agua de refrigeración. Dada la complejidad que presenta la instalación de estos medidores en los conductos de la planta, sin tramos rectos, y que está catalogada como de nivel 3, se seleccionó como más adecuado el electromagnético por inserción.

Una vez recibidas las ofertas técnico-comerciales se procedió a la selección y compra de instrumentación y, por último, a su instalación, verificación y conexión con el sistema de adquisición de datos del grupo 3.

### **5.4.3 Fase 3: desarrollo de los modelos matemáticos, SW y HW**

Comprendió varias tareas, entre las cuales se encuentran: la determinación de las bases teóricas del modelo; la definición del modelo; la definición y selección del "hardware" y "software" necesario para el proyecto; el desarrollo del modelo predictivo de determinación de rendimiento y NO<sub>x</sub>, y la selección de los algoritmos informáticos de cálculo. Sólo se resumirán aquí algunos aspectos relevantes del diseño y desarrollo de esta tercera fase.

#### **3.1 Actividad 1: determinación de las bases teóricas del modelo**

En esta actividad se realizó un análisis detallado de las distintas técnicas de simulación o tratamiento de datos aplicables a la optimización de la operación de centrales térmicas. Atendiendo a los criterios de diseño especificados para este proyecto, ya mencionados, se adoptó la decisión de que

el sistema OPTINOX se diseñara con la capacidad de realizar el ajuste "fino" de la operación del grupo 3 de la central térmica de Compostilla.

Para seleccionar el método de optimización capaz de cumplir ese requisito fundamental se estudiaron los fundamentos, estructura, ventajas y limitaciones de utilización de las metodologías identificadas, en principio, como de mayor aplicabilidad (redes neuronales, sistemas expertos lógicos y borrosos, y algoritmos genéticos), reseñándose, asimismo, las características más relevantes de otras herramientas, como los algoritmos matemáticos (simplex y similares), los métodos estadísticos y los códigos CFD.

En este contexto, el empleo de técnicas de tratamiento de datos "avanzadas", tales como redes neuronales o algoritmos genéticos, para la localización "off-line" de zonas de operación óptima, objetivo de muchos de los desarrollos existentes actualmente, se consideró que no debía constituir la finalidad del modelo OPTINOX. Esta decisión se basó en el éxito, comprobado en C.T. Compostilla, de metodologías alternativas como la realización de pruebas de sensibilidad paramétrica y máxima mejora, según el esquema aplicado en el proyecto RNA citado, así como en otros internos destinados a la optimización de la combustión en este tipo de plantas.

De este modo, la configuración del OPTINOX se estableció con objeto de posibilitar el ajuste "fino" de la operación basándose en el análisis del comportamiento de variables externas y en la detección de malfunciones de combustión. En función de las características de las metodologías de modelización y tratamiento de datos indicadas, se adoptó la siguiente estructura a desarrollar: sistema experto (supervisión y actualización del sistema); red neuronal (predicción), y algoritmo genético (optimización).

### **3.2 Actividad 2: definición general del modelo.**

Tuvo por objeto realizar la definición general del sistema o modelo OPTINOX, consistente en la especificación de sus condiciones de contorno, de sus variables de entrada y salida, su planteamiento funcional, capacidades operativas y estructuración, así como la planificación del proceso de elaboración de algoritmos y programas.

Asimismo, sobre la base del esquema genérico del modelo propuesto, se culminaron otras tareas necesarias para la definición completa del modelo. Fueron las siguientes:

- La definición de los escenarios de operación a considerar.
- La definición de las distintas combinaciones de variables de operación y parámetros de calculados de eficiencia que permiten caracterizar la operación en la caldera, información que en buena parte fue obtenida en el proyecto RNA.
- Estructuración de los módulos/componentes del modelo. Análisis de sinergia entre los distintos componentes y prediseño de todos los elementos a programar: bases de datos, redes neuronales, sistemas expertos, algoritmos genéticos e interfaces.
- Planificación de la programación. Definición de los alcances, cronogramas e interacciones entre los diferentes paquetes de "software" para la programación, según lo estructurado en la actividad anterior.

### 3.3 Actividad 6: desarrollo de los algoritmos informáticos de cálculo

Para cumplimentar esta actividad se desarrolló un "software" propio para cada uno de los elementos del sistema OPTINOX:

- Redes neuronales.
- Algoritmos genéticos.
- Sistemas expertos.

La técnica y metodología de programación ha sido similar para cada una de las tres herramientas de cálculo citadas, con objeto de conseguir elementos estándares totalmente automatizados y modulares que las conviertan en autosuficientes para implantarlas en cualquier sistema general de optimización sin necesidad de retocar su codificación.

En resumen, se han desarrollado tres objetos componentes (tecnología COM "Component Object Model"), que permiten reutilizar su código en tantas aplicaciones futuras como se planteen. Esta tecnología permite agrupar un conjunto de objetos simples, datos y funcionalidad de los mismos, junto con las interfaces necesarias para su utilización, en cualquier "software" programable. En definitiva, se trata de un conjunto de funciones y datos que pueden ser llamados y modificados al nivel de programación externa al propio objeto.

En cuanto a los lenguajes de programación que se han empleado, dado que la plataforma más empleada actualmente en la industria es WINDOWS NT, se han usado los compiladores de VISUAL C++ y VISUAL BASIC de MICROSOFT, para garantizar una mayor compatibilidad entre el desarrollo y las plataformas donde se integra.

Asimismo, al constatarse la falta de idoneidad de ciertos cálculos realizados por el software PMW de planta para que pudieran ser entradas del OPTINOX, se adecuaron los mismos ajustándolos a las necesidades de proyecto. En concreto, las actividades realizadas fueron las siguientes:

- Añadir todos los cálculos que determinan las eficiencias de cada uno de los bancos de intercambios convectivos. Para cada uno de estos, así como para las paredes de agua y vapor ha sido necesario establecer los algoritmos que calculan el intercambio energético, la eficiencia y el ensuciamiento. Con este fin se ha realizado un estudio detallado de la geometría de la instalación, disposición de los sopladores y reparto energético en la caldera.
- Rehacer completamente el cálculo del rendimiento de caldera, añadiendo al mismo las variables relacionadas con el proceso de soplado.

#### 5.4.4 Fase 4: implementación del sistema.

Esta última fase de este proyecto fue ejecutada realizándose las tres actividades que se resumen seguidamente: configuración de las bases de datos; instalación del sistema conectándolo con el SAD de la planta, y sus pruebas de validación y puesta a punto.

#### 4.1 Actividad 1: configuración de las bases de datos

Se crearon y programaron todas las bases de datos del sistema, para lo cual hubo que realizar los siguiente trabajos:

- Definición de la estructura de las bases de datos.
- El desarrollo y la programación de las bases de datos.
- La adquisición y el tratamiento de los datos de planta tomados en pruebas.

Aunque no estaba especificado en el alcance inicial del proyecto, el sistema ha sido dotado, además, con la capacidad de autoentrenar los modelos a partir de los datos en continuo que recibe, siendo estos, por tanto, de una mayor validez a lo largo del tiempo y permitiendo la adecuación de aquéllos a condiciones operativas sustancialmente diferentes a las existentes cuando el sistema fue diseñado. Con este fin, se han incluido:

- Nuevas bases de datos, que gestionan aquellos necesarios para el entrenamiento.
- Un sistema experto adicional que evalúa la necesidad de actualizar un modelo y de obtener, de estas bases de datos dedicadas, los datos que sean precisos para el entrenamiento de los modelos.
- El cálculo de índices de fiabilidad e incertidumbre que ayudan al sistema experto a establecer la validez de un determinado modelo.

El OPTINOX, como estaba contemplado en un principio, podrá también ser reentrenado con datos nuevos del grupo, a voluntad del operador. De esta forma, se posibilita una correcta documentación de las pruebas paramétricas de combustión que pudieran realizarse en el futuro, estableciéndose una potente herramienta de análisis de la información obtenida que servirá de gran ayuda en la toma de decisiones por parte del personal de operación y explotación de la central.

#### **4.2 Actividad 2: instalación del sistema, conectándolo con el sistema de supervisión del grupo 3 de la central térmica de Compostilla.**

Se diseñó el "software" necesario para comunicar el OPTINOX con el sistema de optimización de soplado y con el sistema de adquisición de datos (SAD) y PMW. Además, se establecieron las interfaces de comunicación con el sistema de monitorización local de gases (OPTICOM) y con el laboratorio de análisis de la planta, al objeto de que desde aquí se aportaran los datos de los combustibles empleados.

Asimismo, se diseñó un "software" auxiliar que permite a los operadores introducir la información relativa a dos variables de regulación de la operación: 1), el estado de posición de las compuertas de aire; y 2), la posición angular, o de apertura, de los clasificadores de los molinos.

#### **4.3 Actividad 3: pruebas de validación y puesta a punto del sistema**

Para el ajuste y aprendizaje inicial de los modelos que incorpora el sistema se realizaron varios programas de pruebas con el objetivo de depurar, ajustar y validar los diferentes modelos. A continuación se detallan los distintos volúmenes de datos procesados y cómo se han utilizado los

mismos para obtener el prototipo de demostración del sistema, instalado en la centra térmica de Compostilla:

- Campaña de pruebas paramétricas de caracterización de la caldera, destinada a que el sistema aprendiera los estados de operación y posición de las variables de regulación que motivan comportamientos tendenciales en las emisiones de NO<sub>x</sub> y consumos específicos. Fue un conjunto de 81 pruebas que permitió el entrenamiento, ajuste y validación de las redes neuronales utilizadas para predecir el comportamiento de la caldera respecto a NO<sub>x</sub> y rendimientos.
- Campaña de recopilación de datos relativos al sistema de soplado. Se analizaron las secuencias de soplado que suelen aplicarse en la C.T. Compostilla II para, a continuación, recopilar y estudiar todos los datos históricos correspondientes a seis semanas de operación. Adicionalmente, se programó y efectuó una campaña de pruebas orientada a cubrir aquellos aspectos de la operación de soplado no recogidos en las bases de datos de la planta. La totalidad de esta información fue utilizada para el entrenamiento de la red neuronal del módulo de soplado así como para la configuración de reglas del sistema experto.

## 5.5 RESULTADOS OBTENIDOS

El objeto establecido para el sistema OPTINOX: ser un prototipo demostrador de un sistema de supervisión ("advisory system") avanzado que proporcione en tiempo real instrucciones fiables y depuradas al personal de operación y explotación de centrales térmicas quemando combustibles bajos en volátiles, típicamente antracitas, al objeto de que el mismo pueda actuar sobre los parámetros primarios de combustión y optimizar el consumo específico y/o reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> fue plenamente alcanzado. En este sentido, el alcance, funcionalidad y prestaciones especificados en el contrato oficial celebrado para la ejecución de este proyecto se han cubierto satisfactoriamnte.

El empleo del OPTINOX, en las pocas semanas que se encuentra operativo, tras haber sido validado, se ha revelado como muy positivo. Se revela como una muy eficaz herramienta de optimización de la combustión, sobre todo al verse apoyado por los sistemas auxiliares de muestreo que se le añadieron para incrementar su fiabilidad, ya mencionados, particularmente el de monitorización zonal de gases encima del arco de quemadores (OPTICON).

Como prestaciones o capacidades adicionales conseguidas con su realización y que no estaban contempladas en el alcance inicial del proyecto, cabe destacar:

- El desarrollo específico de un sistema de aseguramiento de la calidad de las señales críticas que procesa. Se aplica este "filtro" sobre las señales del sistema de adquisición de datos de la planta que entran directamente en el sistema; y sobre las que el SAD entrega en el PMW que influyen en los resultados con que éste alimenta al OPTINOX para que este realice su procesamiento.
- La mejora de los algoritmos de cálculo de rendimientos del PMW del grupo3 de la C.T. Compostilla II.

- El desarrollo e incorporación de un sistema "on-line" de evaluación de la necesidad de autoentrenamiento.
- El desarrollo e incorporación de un módulo de cálculo y optimización del soplado.

El sistema diseñado, instalado y validado logra la optimización del funcionamiento de la caldera y la reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub>, permitiendo:

1. Definir ensayos paramétricos para la caldera en función de las recomendaciones que hace el sistema para obtener nuevos modelos o mejorar los existentes.
2. Recopilar automáticamente de la base de datos la información obtenida de las pruebas anteriores.
3. Analizar los resultados automáticamente aplicando la metodología y la experiencia previa de INERCO y ENDESA en el proyecto ECSC 7220-ED-034 .
4. Predecir y optimizar NO<sub>x</sub> y rendimiento de combustión, tanto por separado como conjuntamente, o según una función de coste que contempla el coste de penalizar económicamente uno u otro.

El incremento en el rendimiento de combustión del grupo 3, obtenido mediante la optimización de su operación facilitada por el OPTINOX, se ha evaluado, en régimen de plena carga, en el 1,5 %. En términos económicos, esto supone para ENDESA, S.A., un ahorro en el coste de su combustible, principal coste de estas instalaciones (que supone como media un 85% del coste total de operación), de unos 100 Mptas/año (0,6 Meuros /año).

Para cada conjunto de condiciones de contorno y variables de operación, el rango de mejora del rendimiento, o consumo específico, se ve acompañado por otro de reducciones de NO<sub>x</sub> de hasta el 30%, según se ha podido verificar experimentalmente. También el sistema puede determinar, para un escenario de operación donde se establezcan unas restricciones de operación dadas, y calculados unos costes para la pérdida porcentual de rendimiento y aumento unitario de emisión de NO<sub>x</sub>, aquella estrategia de operación que minimiza el coste para la planta. Con ello, el OPTINOX se prepara para poder soportar una potencial legislación medioambiental que obligue a optimizar el binomio rendimiento-contaminación.

## 5.6 CONCLUSION

Como conclusión, los resultados técnicos, económicos y medioambientales del proyecto RENOX , alcanzados como consecuencia de la finalización plenamente satisfactoria de las dos fases en que el mismo se dividió, secuencialmente: la fase 1, proyecto RNA; y la fase 2, proyecto OPTINOX, y que pueden ser resumidos por el óptimo resultado alcanzado por su objetivo final: el sistema supervisor avanzado, OPTINOX, capaz de optimizar la operación de la planta donde se instale en cuanto a rendimiento y emisiones se refiere, han sido:

1. Incrementar la competitividad de la instalación industrial al lograr reducir el coste asociado a la producción de energía eléctrica por un mejor ajuste de la operación de la

caldera que se traduce en un mejor rendimiento de combustión, que puede alcanzar el 1,5%.

2. Procurar una reducción sustancial de las emisiones atmosféricas, hasta el 30% (500 mg/Nm<sup>3</sup>, a 6% O<sub>2</sub>) sin merma notable del rendimiento. La reducción de emisiones atmosféricas se produce por dos vías:
  - Directa: reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> por la adopción de medidas de ajuste de combustión, objetivo alcanzado por el sistema OPTINOX.
  - Indirecta: al mejorarse el consumo específico de la instalación, se consume menos combustible (1.5% menos) y se reducen, en la misma proporción, las emisiones asociadas.
3. Técnicamente, se trata de un sistema avanzado de información y optimización, fácil de utilizar, ("amigable"), que favorece la "interactividad" con los operadores, supervisores y personal técnico directivo de la planta, cada uno con sus utilidades y niveles de acceso, de tal forma que con su instalación se mejora enormemente la información de supervisión, a la vez que se facilita enormemente la búsqueda de las mejores alternativas de operación para cada condición concreta de operación de la planta..
4. Es un magnífico medio de enseñanza a los operadores, al permitirles disponer, en tiempo real, tanto de la información ligada a sus propias actuaciones, como a su evaluación en relación con los óptimos establecidos en el registrados.

**"REDUCCIÓN DE EMISIONES DE NO<sub>x</sub> EN LA  
COMBUSTIÓN DE CARBONES ANTRACITOSOS  
("RENOX")"**

**INFORME FINAL**

**FIGURAS**

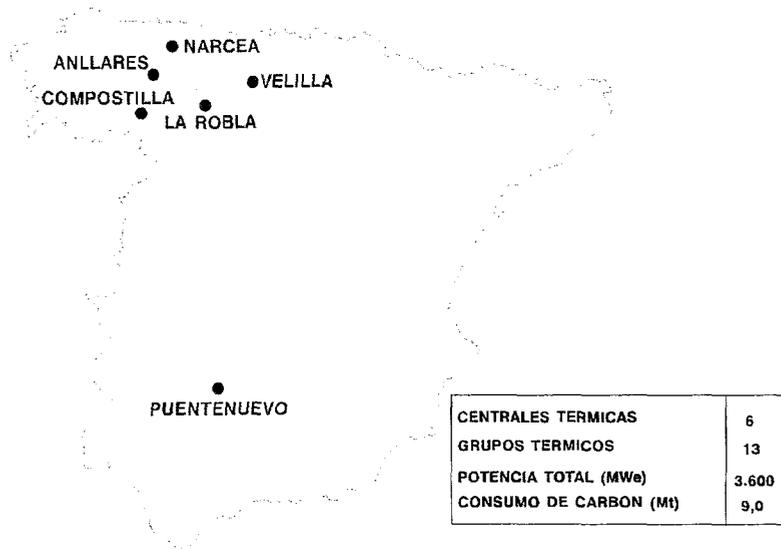


Figura 1a : Centrales térmicas españolas que consumen carbones bajos en volátiles

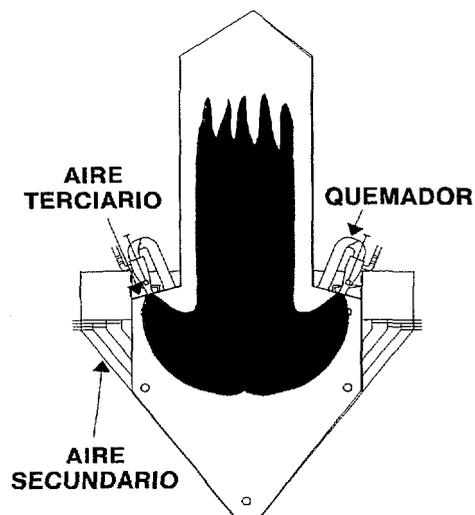


Figura 1b : Esquema de caldera de doble arco

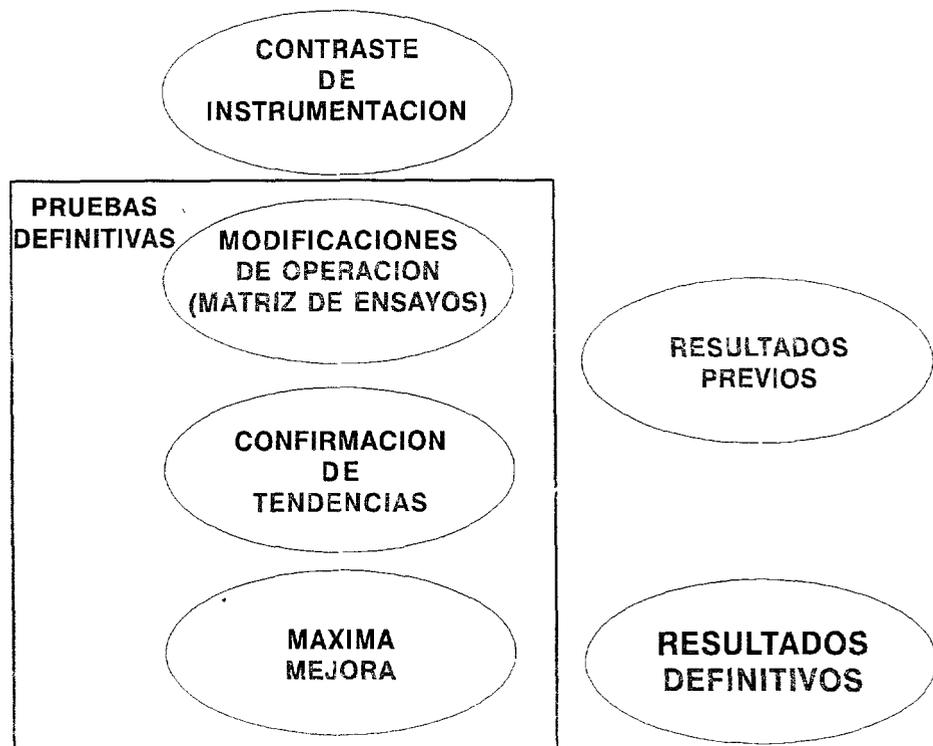


Figura 2: Estructuración de las campañas de medidas

VARIABLES	NIVELES							
	3,5%	4,2%*			5,0%		5,5%	
MOLINOS (QUEMADORES) FUERA DE SERVICIO	B1,B2,E3,E4	A	B	C	D	E*	F	E3,E4,F3,F4
RELACION AIRE SECUND./TERC.	+A.S.		NORMAL			+ A.T.		
CARGA DE MOLINOS	UNIFORME				DESIGUAL			
DISTRIBUCION DEL AIRE TERCARIO	+ NIVEL SUPERIOR		+ NIVEL CENTRAL		NORMAL		+ NIVEL INFERIOR	
TEMPERATURA DEL AIRE PRIMARIO	330 °C			350 °C		380 °C		
APOYO DE FUEL-OIL	SIN APOYO			EN QUEMADORES CENTRALES		EN QUEMADORES LATERALES		
DESAIREACIONES	CERRADAS				25% ABIERTAS			
EXTENSION DE LLAMA	NORMAL				MAYOR			
ESCORIACION	NO				SI			

CONDICIONES BASE

Figura 3: Matriz de ensayos de las Pruebas de Modificaciones de Operación

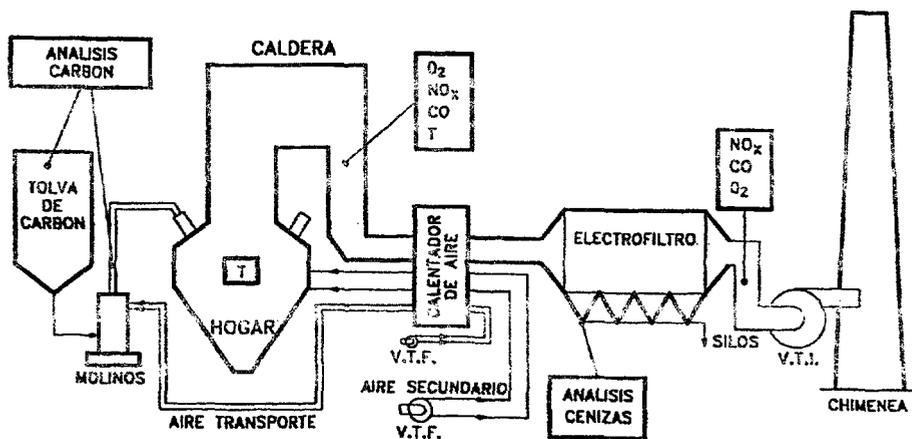


Figura 4: Esquema de actividades realizadas durante las pruebas

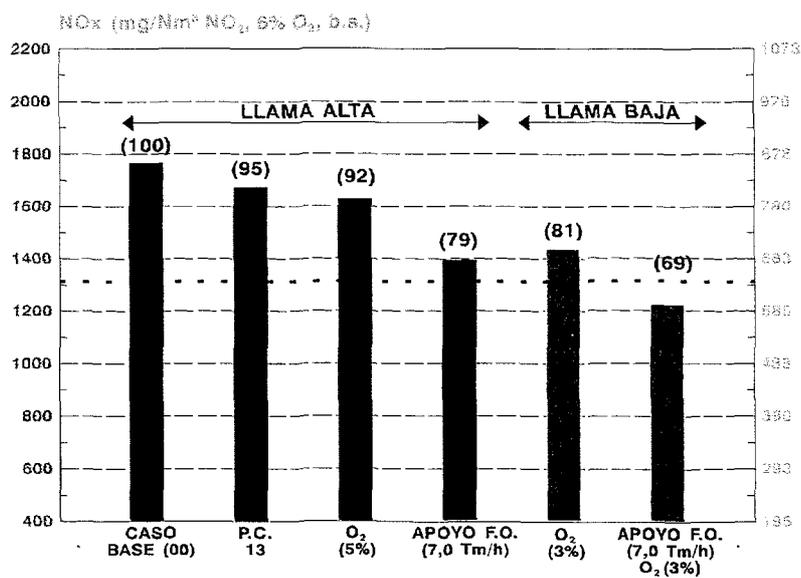


Figura 5: Resultados de emisiones de NO<sub>x</sub> obtenidos en relación al caso base (00) (en trazo discontinuo se representa el límite de 1300 mg/Nm<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub> de posible aplicación futura en C.T. Compostilla)

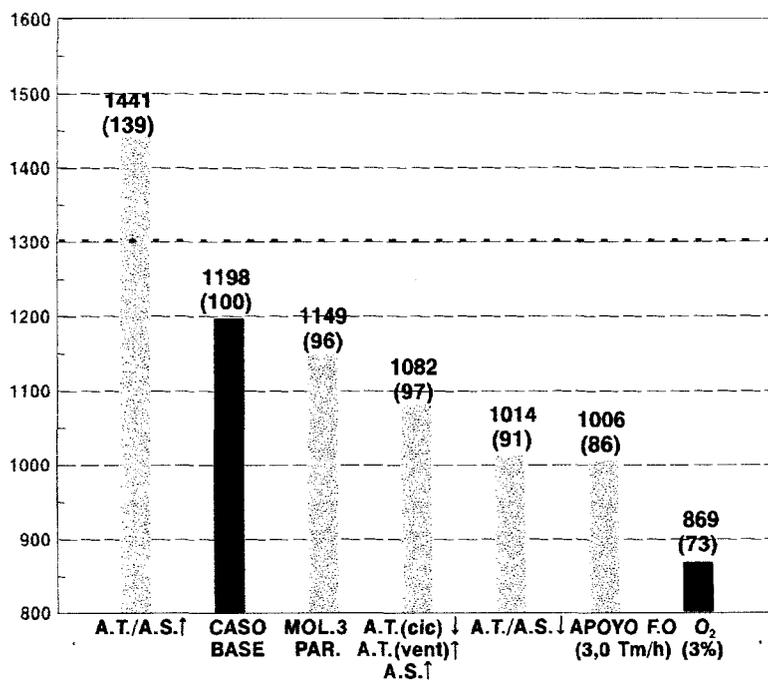


Figura 6. : Resultados de emisiones de NO<sub>x</sub> obtenidos: globales y, entre paréntesis, porcentajes relativos al caso base aplicable más próximo (en trazo discontinuo se representa el límite de 1300 mg/Nm<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub> de posible aplicación futura en C.T. Compostilla)

Tabla 1 : Resultados de medidas en hogar en pruebas RNA más significativas de los Grupos 3 y 4

Características	GRUPO 4		GRUPO 3		
	C.BASE	A.T./A.S.†	C.BASE	A.T./A.S.†	A.T./A.S.‡
Caso típico	00	M35	M08	M10	M13
T <sub>hogar</sub> (cenic.) (°C)	-	-	1352	1416	1356
T <sub>hogar</sub> (inf.) (°C)	1405	1449	1327	1338	1334
T <sub>hogar</sub> (int.) (°C)	1321	1325	1296	1301	1252
T <sub>hogar</sub> (sup.) (°C)	1490	1414	1485	1405	1444
T <sub>hogar</sub> (media) (°C)	1405	1396	1369	1348	1343
T <sub>AQ</sub> (media) (°C)	1614	1555	1591	1594	1581
T <sub>AQ</sub> (central) (°C)	1639	1598	1619	1615	1610
T <sub>AQ</sub> (lateral) (°C)	1596	1511	1561	1573	1552
Dif. T <sub>AQ</sub> (central-lateral) (°C)	43	87	58	42	58
T <sub>AIRE PRIMARIO</sub> (°C)	119	115	112	116	113
T <sub>AIRE SECUNDARIO</sub> (°C)	359	365	334	339	338
Desequilibrio O <sub>2</sub> (P.F. - P.T.) (%)	0,0	1,7	2,9	0,7	1,7



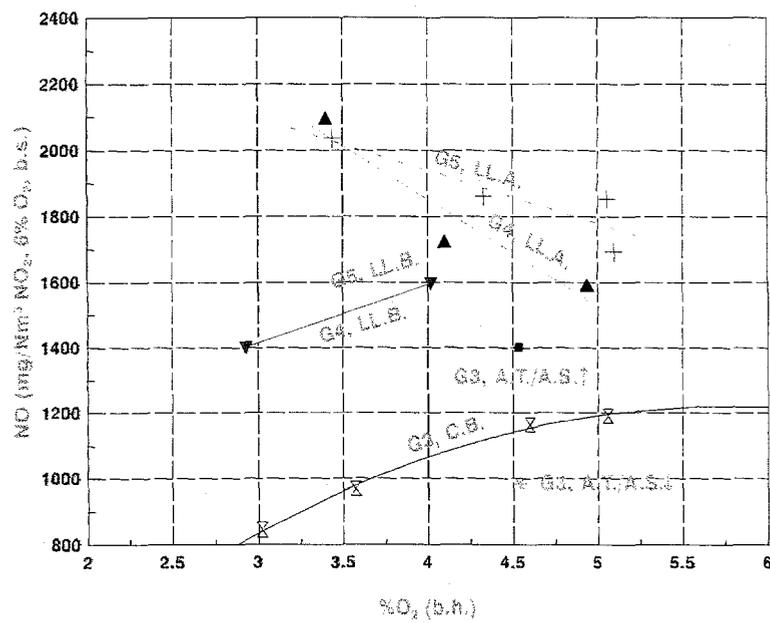


Figura 8 : Relaciones NO/O₂ a nivel global para los Grupos 3, 4 y 5

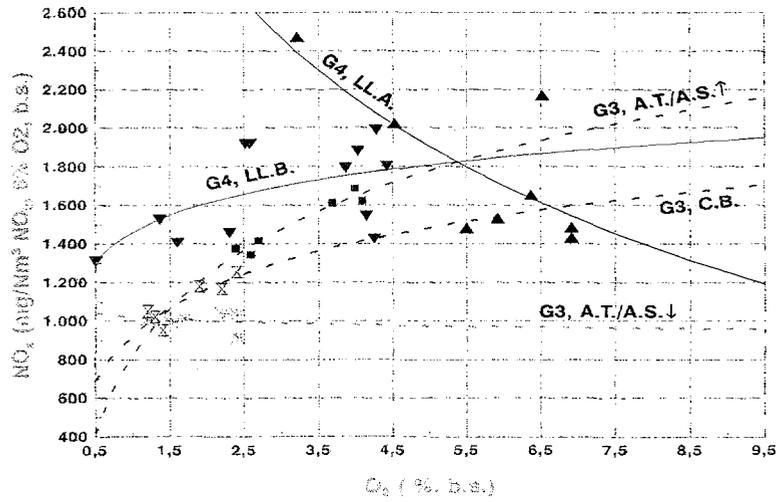


Figura 9 : Relaciones NO<sub>x</sub>/O<sub>2</sub> a nivel del arco de quemadores para los Grupos 3 y 4

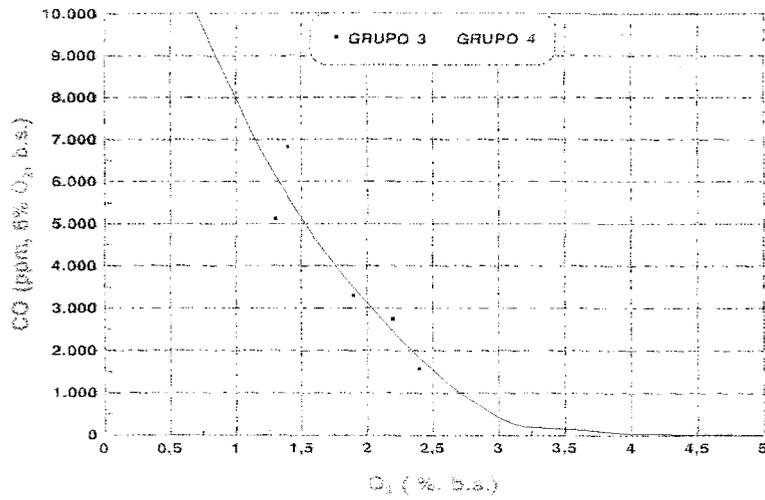
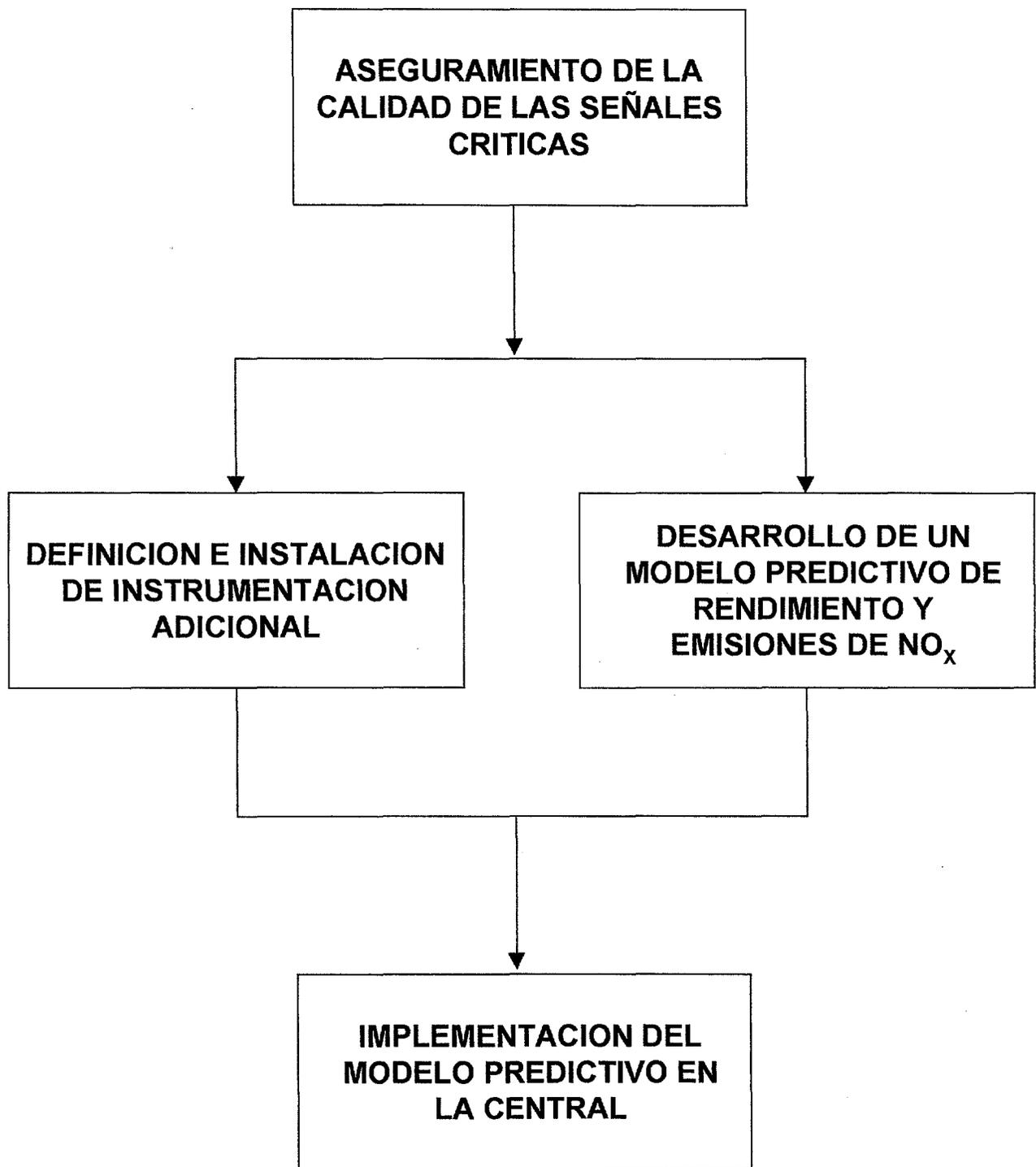


Figura 10 : Relaciones CO/O<sub>2</sub> a nivel del arco de quemadores para los Grupos 3 y 4



**Figura 11: Programa de actividades**

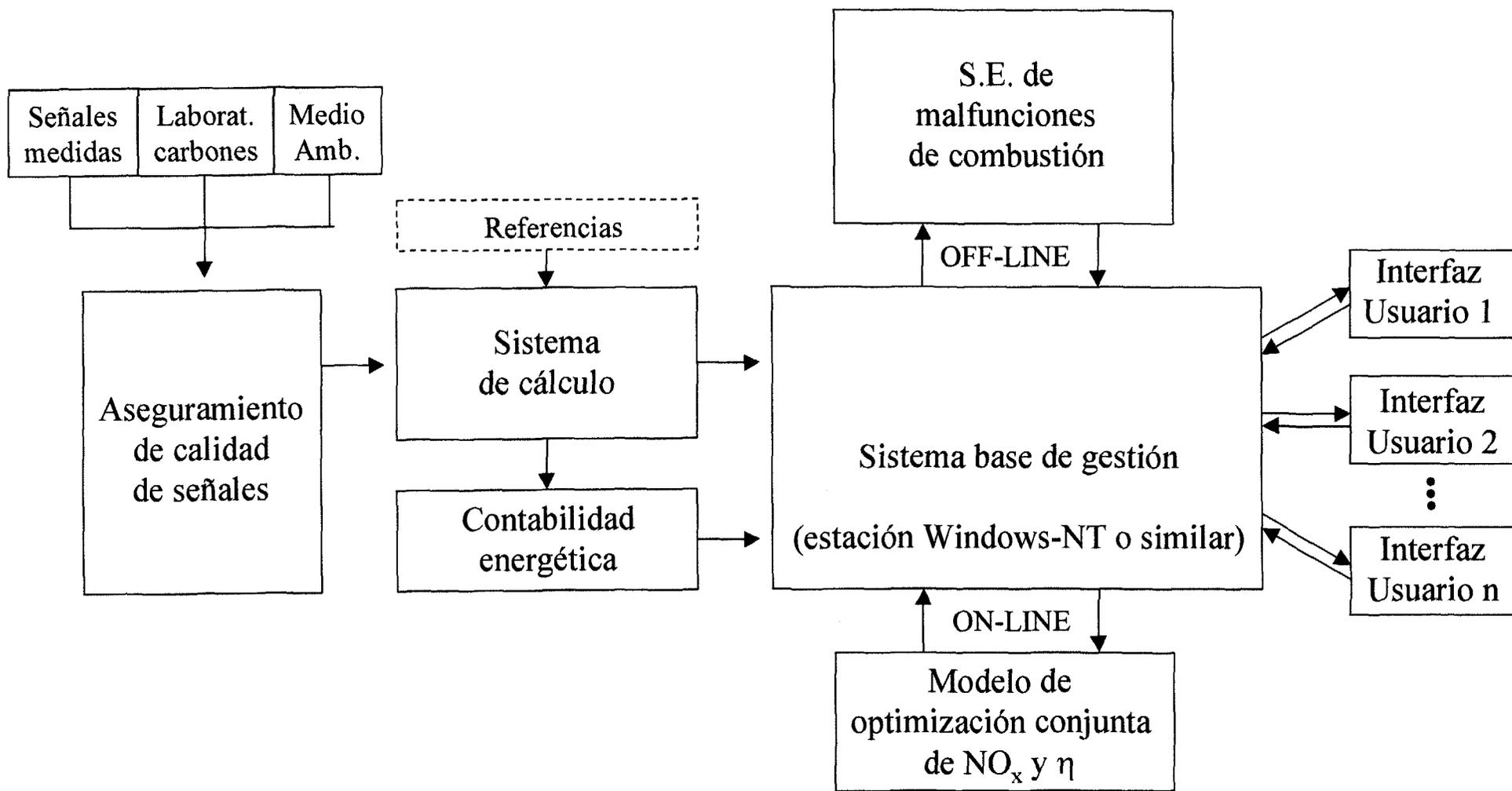


Figura 12: Diagrama de bloques

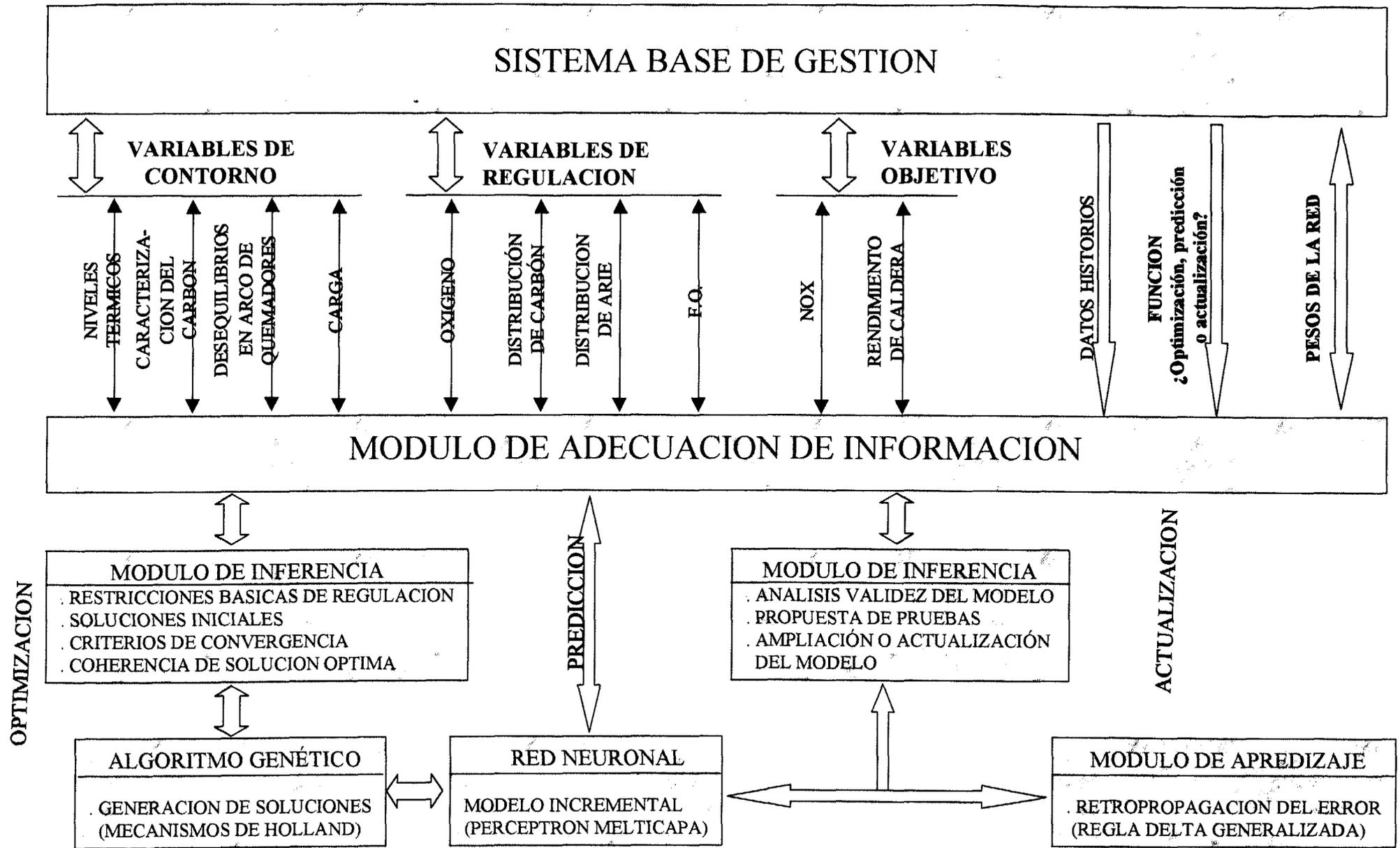


Figura 13: Esquema general del sistema OPTINOX

**OPTINOX. Modelo cargado: BASE (11/11/99) - [Predicción]**

Predicción Optimización Entrenamiento de red Salir

Optimiza Salir Imprimir

**VARIABLES DE CONTORNO**

Tcen (°C)	1352
Tsup (°C)	1485
N (%)	0,96
Cen (%)	32,68
Vol (%)	7,84
Hum (%)	8,26
OPC	0,0850
Carga (MW)	330

**VARIABLES DE REGULACION**

Oxig (%)	4,53	<input checked="" type="checkbox"/>
P.Clas. (%)	54,17	<input checked="" type="checkbox"/>
C.PF/PT		<input type="checkbox"/>
C Centro		<input type="checkbox"/>
A.T.V. (%)		<input type="checkbox"/>
A.T.C. (%)		<input type="checkbox"/>
AS/AT	0,81	<input checked="" type="checkbox"/>
A.PF/PT		<input type="checkbox"/>
A Centro		<input type="checkbox"/>

**CASO BASE ACTUAL**

NOX (mg/Nm3)	1004
RCAL (%)	85,60

V.P. I.L. (%) I.F. (%)

**NOX (mg/Nm3)**

**RCAL (%)**

Tipo de optimización

- Optimiza NOx
- Optimiza R.C.
- Optimiza Coste

Figura 14: Optimización

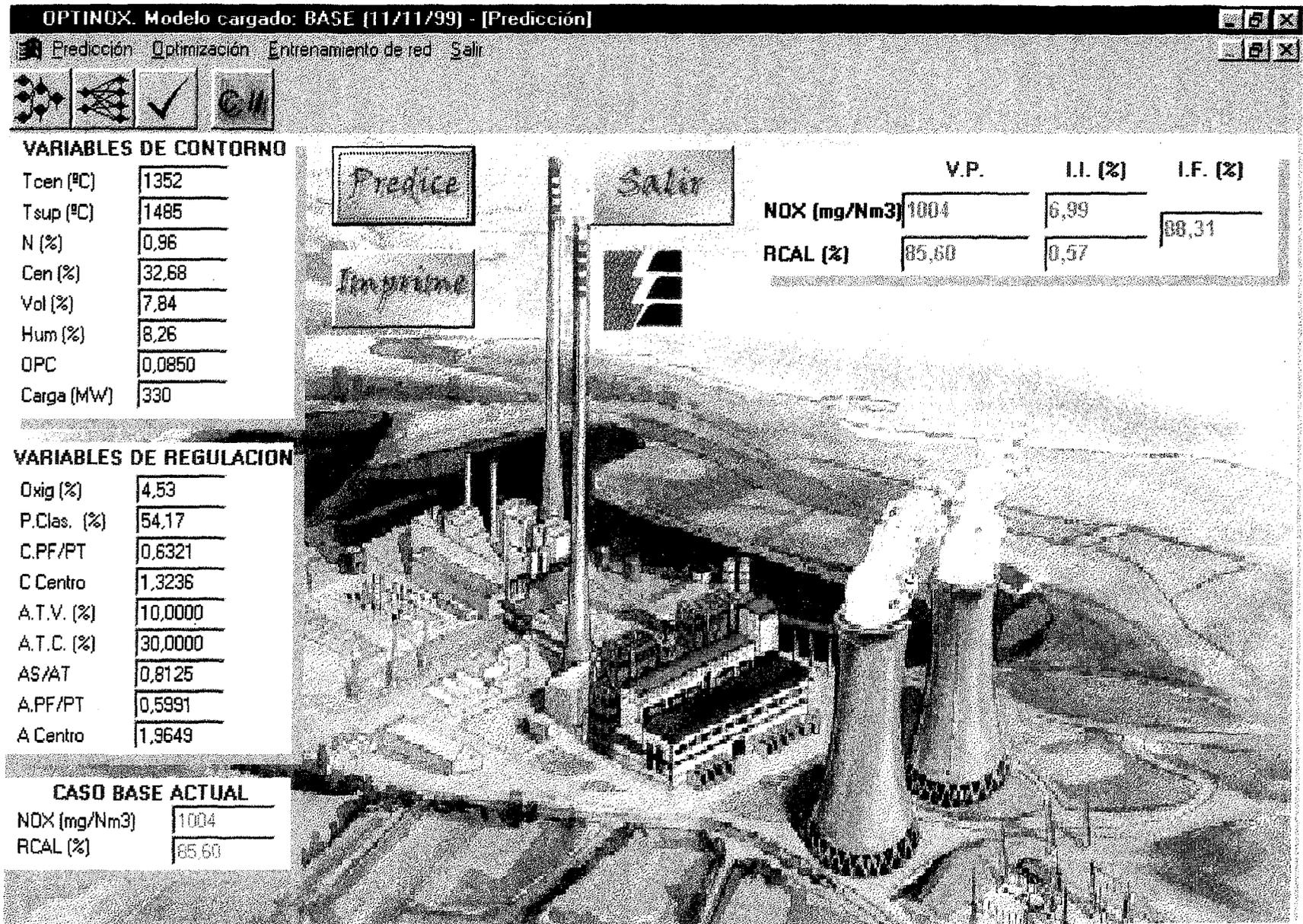


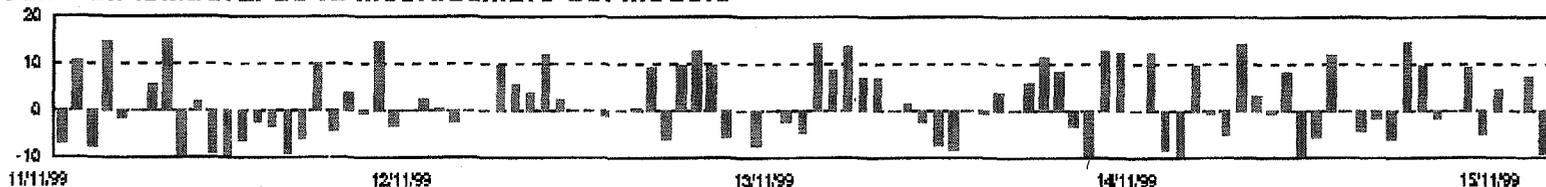
Figura1 5: Predicción



Análisis de la fiabilidad del modelo

	Pruebas del modelo		Variables de contorno		Variables de regulación	
Oxig (%)	3.00	4.50	6.00	7.00	18	
P.Clas. (%)	50.00	55.00	60.00			
C.PF/PT	0.5000	1.0000	1.5000			
C Centro	0.5000	1.0000	1.5000			
A.T.V. (%)	0.0000	25.0000	50.0000	75.0000	100.0000	
A.T.C. (%)	0.0000	25.0000	50.0000	75.0000	100.0000	
AS/AT	0.5000	1.0000	1.5000	2.0000		
A.PF/PT	0.5000	1.0000	1.5000	2.0000		
A Centro	0.0000	2.0000	4.0000			

Evolución temporal de la incertidumbre del modelo



Recomendaciones sobre el modelo

Este modelo no necesita reentrenamiento, ya que tanto la incertidumbre como la fiabilidad del mismo están dentro de los límites tolerables. Si lo desea puede crear un nuevo modelo.

Cargar otro modelo

Actualizar el modelo

Generar un nuevo modelo

Cancelar

Figura 6: Actualización