

MEMORIA CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL PROYECTO *CHITCOLP*

1 Resumen de la Propuesta

INVESTIGADOR PRINCIPAL: Narcís Nabona

TÍTULO DEL PROYECTO: *CHITCOLP* Coordinación Hidrotérmica a Corto y Largo Plazo de la generación eléctrica en un entorno competitivo

RESUMEN: Se aplican diversas técnicas de Optimización para resolver los distintos problemas que componen la coordinación hidrotérmica de la generación de electricidad de una compañía eléctrica en un entorno competitivo (con subasta de generación). Se resuelve la coordinación a largo plazo siguiendo un modelo multiintervalo de Bloom y Gallant, y la coordinación a corto plazo por técnicas de relajación lagrangiana considerando diversas maneras de resolver los subproblemas de planificación hidrotérmica. Se intenta también la optimización global de este último problema.

Se cuenta con la colaboración de diversas compañías de generación eléctrica para el suministro de datos, la explicación de su particular problemática de explotación, y el análisis de los resultados a obtener con los programas desarrollados.

PROJECT TITLE: Short and Long-Term Coordination of Hydrothermal Generation of Electricity in a Competitive Environment

SUMMARY: Optimization techniques of several types are employed to solve the different problems in the hydrothermal coordination of electricity generation of an electric utility in a competitive environment (with generation bids). The long-term coordination is solved through a multi-interval Bloom and Gallant model, and the short-term coordination through Lagrangian relaxation techniques considering several ways of solving the hydrothermal scheduling subproblems. The global optimization solution of this last subproblem is also attempted.

We rely on the cooperation of several electricity generation utilities for the supply of data, the details of their specific exploitation circumstances, and the analysis of the results to be obtained with the codes developed.

2 Introducción

El proyecto presentado abarca dos ámbitos complementarios de un mismo problema: la planificación de la producción de electricidad a largo, y a corto plazo, en un entorno competitivo

2.1 Planificación de la producción a largo plazo en un mercado competitivo

La estacionalidad de la demanda, de las aportaciones naturales hidráulicas, y de los precios y tipos de contrato de ciertos combustibles, requieren una optimización a largo plazo de la producción eléctrica.

La sola optimización a corto plazo basada sólo en el mercado diario, sin respetar estrategias optimizadas de largo plazo, puede conducir a situaciones absurdas de explotación como la del agotamiento de los recursos hidráulicos, que repercute negativamente en los resultados a medio y largo plazo.

La optimización a largo plazo de una cierta compañía en un entorno competitivo de mercado no puede ser contemplada de forma aislada, por no tener definidos unos consumos a satisfacer ni a corto ni a largo plazo. La optimización debe contemplar todas las compañías que operan en el mercado, y debe tener en cuenta el consumo total de este mercado, el cual sí es bien conocido. Los medios de producción propios deben ser modelizados en detalle; en cambio los medios de producción de las compañías competidoras pueden ser modelizados de forma más simplificada, utilizando algunas agregaciones.

A largo plazo hay un concepto clave para la compañía, que es la cuota de mercado (factor de participación en la cobertura de la carga) en cada intervalo del largo plazo, y las cuotas globales para agregaciones de longitud creciente de intervalos (primer mes, primer trimestre, primer semestre, etc.). Las cuotas pueden particularizarse para subconjuntos de medios de producción con características específicas (toda la hidráulica, la nuclear, etc.). La fijación de las diversas cuotas en el largo plazo de una compañía es una decisión estratégica, ya que indica un objetivo que se pretende alcanzar. Estas cuotas se deben incorporar en la optimización como restricciones a satisfacer, y el problema resultante podría no tener solución.

Si el problema tiene solución se debe fijar la función a optimizar, y ésta debe ser la suma de costes de producción de todas las compañías a lo largo de todo el periodo de largo plazo. Los resultados de la optimización darán dos tipos de información:

- * en primer lugar, la mejor estrategia de largo plazo de la compañía propia para alcanzar la participación establecida por las cuotas impuestas en las restricciones, y
- * en segundo lugar, (pero no menos importante) los precios-sombra (multiplicadores de Lagrange) de las restricciones impuestas de cuotas de participación revelarán si estas cuotas impuestas eran o no excesivas dados los costes propios y los de las compañías competidoras.

De un análisis de los resultados obtenidos se pueden ajustar las cuotas de participación y obtener así una optimización realista a largo plazo de la estrategia de producción propia (con lo cual se pueden optimizar las compras de combustibles, los contratos de largo plazo, etc.)

Las producciones correspondientes a la primera semana, que constituirán el primero de los intervalos del periodo de largo plazo optimizado, deberían ser respetadas por las optimizaciones de corto plazo a efectuar para los mercados diarios de esta semana.

2.1.1 Problema computacional de largo plazo

Para llevar a término la optimización a largo plazo descrita, debe disponerse de un programa de coordinación hidrotérmica a largo plazo que permita incorporar restricciones de cuota de mercado de un intervalo o de un grupo de intervalos, y que proporcione en el óptimo los multiplicadores de Lagrange (precios-sombra) de estas restricciones (para poder acercar las cuotas impuestas a niveles realistas).

Debe además poder incorporar restricciones sobre la energía generada dentro de un intervalo (como las que requiere la operación de una unidad de ciclo combinado), y en un conjunto de intervalos, para

una o más unidades de generación (como la restricción de uso de gas a lo largo de un año, adquirido por contrato *take-or-pay*, por parte de todas las unidades que lo empleen).

Este programa debe ser capaz de incluir todas las unidades de generación que participan en el mercado, aunque las de los competidores pueden ser agregadas en diversos subconjuntos de características homogéneas y debe recubrir las monótonas de cargas del conjunto del mercado de cada intervalo. Esto conlleva una alta dimensión de problema y un número muy alto de restricciones, y requiere un programa eficiente para poder resolverlo en un tiempo razonable.

La modelización de la generación hidráulica puede tener diversos niveles de aproximación:

- ★ puede ser simplificada, considerando sólo una energía disponible para cada embalse o grupo de embalses en el periodo considerado, y el programa distribuirá esta energía (teniendo en cuenta la potencia instalada) entre los distintos intervalos que componen el periodo, o
- ★ puede ser detallada, considerando las descargas, volúmenes y generaciones de cada embalse teniendo en cuenta las aportaciones naturales estocásticas de agua, y el programa determinará la evolución óptima de los niveles de agua en cada embalse a lo largo de los intervalos.

La modelización detallada requiere más variables y restricciones (mayor dimensionalidad aún del problema), pero proporciona información más operativa que la modelización simplificada.

2.1.2 Formulación Sucinta del Modelo de Largo Plazo con Hidráulica Simplificada

Sea N_i el número de intervalos en el que subdivide el periodo de largo plazo. El supraíndice i caracterizará a todas las variables correspondientes al intervalo i^{esimo} ; así T^i expresará la duración de cada intervalo. Sea N_u el número de unidades térmicas, y M y N expresan los conjuntos de índices de embalses (con generación hidráulica) propios y de las compañías competidoras respectivamente.

E_j^i representa el valor esperado de la energía generada por la unidad j durante el intervalo i , y h_l^i el valor esperado de la energía generada por el embalse l durante el intervalo i . Suponemos unos totales esperados de generación hidráulica para todo el periodo de estudio \bar{H}_M y \bar{H}_N respectivamente para los conjuntos de embalses propios y de las compañías competidoras, de los cuales se conocen unas capacidades máximas totales \bar{C}_{HM} y \bar{C}_{HN} .

$$\underset{E_j^i, \tilde{H}_M^i, \tilde{H}_N^i}{\text{minimizar}} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_u} f_j E_j^i \quad (1)$$

$$\text{sujeto a: } \sum_{j \in \omega} E_j^i + \tilde{H}_{M\omega}^i + \tilde{H}_{N\omega}^i \leq \hat{E}^i - W^i(\omega) \quad \forall \omega \in \Omega \quad \forall i \quad (2)$$

$$\tilde{H}_M^i \leq \bar{C}_{HM} T^i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \tilde{H}_M^i = \bar{H}_M \quad (4)$$

$$\tilde{H}_N^i \leq \bar{C}_{HN} T^i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \tilde{H}_N^i = \bar{H}_N \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \left\{ \sum_{j \in \mathcal{E}} E_j^i + \tilde{H}_M^i \right\} \geq \theta_i \sum_{i=1}^{N_i} \hat{E}^i \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_u} A_{jk}^i E_j^i \geq b_k, \quad k = 1, \dots, N_n \quad (8)$$

$$E_j^i \geq 0 \quad j=1, \dots, N_u, \quad \tilde{H}_M^i \geq 0, \quad \tilde{H}_N^i \geq 0, \quad \forall i \quad (9)$$

donde $\forall i$ significa $i=1, \dots, Ni$ y ω es cualquier subconjunto del conjunto $\Omega=\{1, 2, \dots, Nu\}$.

La función objetivo (1) expresa el coste total de generación en los Ni intervalos. Es lineal respecto a las energías térmicas generadas E_j^i . f_j es el coste lineal de la $j^{\text{ésima}}$ unidad (de la que se subtrae el coste f_X de la energía externa).

Las restricciones (2) son las de recubrimiento de Bloom y Gallant extendidas al caso de generación hidráulica. (2) asegura que las generaciones térmicas e hidráulicas de todos los intervalos cubren exactamente sus monótonas de carga respectivas. El subíndice ω en $\tilde{H}_{\mathcal{M}\omega}^i$ y $\tilde{H}_{\mathcal{N}\omega}^i$ indica que este término formará parte de (2) si el conjunto considerado ω contiene la pseudo-unidad hidráulica. Nótese que al haber un número exponencial de subconjuntos $(2^{Nu}-1)$ ω de Ω (2) está constituido por $N_i \times (2^{Nu}-1)$ restricciones!!

La función $W^i(\omega)$ representa la carga no cubierta de la monótona del intervalo i (cuya energía es \hat{E}^i) una vez cargadas en orden de mérito las unidades del conjunto ω [18, 105].

2.1.3 Formulación Sucinta del Modelo de Largo Plazo con Hidráulica Detallada

Sea N_e el numero de generaciones hidráulicas en embalses.

E_j^i representa el valor esperado de la energía generada por la unidad j durante el intervalo i .

$$\text{minimizar}_{h_k^i, E_j^i} \sum_{i=1}^{Ni} \sum_{j=1}^{Nu} f_j E_j^i \quad (10)$$

$$\text{sujeto a:} \quad \sum_{j \in \omega} E_j^i + \tilde{H}_{\mathcal{M}\omega}^i + \tilde{H}_{\mathcal{N}\omega}^i \leq \hat{E}^i - W^i(\omega) \quad \forall \omega \in \Omega \quad \forall i \quad (11)$$

$$v_{k,l}^i + d_{k,l}^i - d_{k,l-1}^i - v_{k,l-1}^{i-1} = a_{k,l}^i \quad l = 1, \dots, N_e \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad \forall i \quad (12)$$

$$\sum_{k=0}^{K-1} v_{k,l}^i \leq \bar{v}_l \quad \sum_{k=0}^{K-1} d_{k,l}^i \leq \bar{d}_l, \quad l = 1, \dots, N_e \quad \forall i \quad (13)$$

$$h_{\mathcal{M}k}^i = \sum_{m \in \mathcal{M}} h_{k,m}(v_{k,m}^{i-1}, v_{k,m}^i, d_{k,m}^i) \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad \forall i \quad (14)$$

$$h_{\mathcal{N}k}^i = \sum_{n \notin \mathcal{M}} h_{k,n}(v_{k,n}^{i-1}, v_{k,n}^i, d_{k,n}^i) \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad \forall i \quad (15)$$

$$h_{\mathcal{M}0}^i + \left(\frac{\pi_1}{2} + \sum_{k=2}^{K-1} \pi_k\right) h_{\mathcal{M}1}^i + \left(\frac{\pi_2}{2} + \sum_{k=3}^{K-1} \pi_k\right) h_{\mathcal{M}2}^i + \dots + \frac{\pi_{K-1}}{2} h_{\mathcal{M}K-1}^i = \tilde{H}_{\mathcal{M}}^i \quad \forall i \quad (16)$$

$$h_{\mathcal{N}0}^i + \left(\frac{\pi_1}{2} + \sum_{k=2}^{K-1} \pi_k\right) h_{\mathcal{N}1}^i + \left(\frac{\pi_2}{2} + \sum_{k=3}^{K-1} \pi_k\right) h_{\mathcal{N}2}^i + \dots + \frac{\pi_{K-1}}{2} h_{\mathcal{N}K-1}^i = \tilde{H}_{\mathcal{N}}^i \quad \forall i \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \left\{ \sum_{j \in \mathcal{E}} E_j^i + \tilde{H}_{\mathcal{M}}^i \right\} \geq \theta_{\tau} \sum_{i=1}^{N_i} \hat{E}^i \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{Ni} \sum_{j=1}^{Nu+1} A_{jk}^i E_j^i \geq b_k, \quad k = 1, \dots, N_n \quad (19)$$

$$E_X^i \geq 0 \quad E_j^i \geq 0 \quad j=1, \dots, Nu \quad v_{k,l}^i \geq 0 \quad d_{k,l}^i \geq 0 \quad l=1, \dots, N_e \quad k=0, \dots, K-1 \quad \forall i \quad (20)$$

Nótese que las funciones objetivo (10) y (1) coinciden, y también las restricciones (11,18,19) y (2,7,8) respectivamente. En esta formulación las restricciones (12-17) substituyen las (3-6), que son pocas y simples y no involucran variables que no sean valores esperados de energías, como los volúmenes $v_{k,l}^i$ y descargas $d_{k,l}^i$ multiartículo de cada embalse [95].

Las igualdades (16) definen el valor esperado de la generación hidráulica \tilde{H}^i de cada intervalo a partir de un modelo de K artículos [95] de la generación hidráulica estocástica. Dados una distribución de $K-1$ bloques con probabilidades π_k $k=1, \dots, K-1$ y cantidades de generación hidráulica

h_k^i $k=0, 1, \dots, K-1$ bajo cada bloque — siendo h_0^i determinista —, \tilde{H}^i expresada como (16) es el valor esperado de la generación hidráulica en el intervalo i ésimo.

Las restricciones (14) representan la generación hidráulica $h_{k,l}$ en el embalse l para las variables hidráulicas del artículo k en función de las variables hidráulicas a optimizar de descargas $d_{k,l}^i$ y volúmenes embalsados iniciales y finales $v_{k,l}^{i-1}$ y $v_{k,l}^i$ [95, 101]. Las ecuaciones de balance multiartículo en la red hidráulica replicada se representan en (12), donde $d_{k,l-1}^i$ corresponde a la suma de las descargas de los embalses aguas arriba del embalse l que dan agua directamente al embalse l , y $a_{k,l}^i$ es la aprotación natural del artículo k en el embalse l durante el intervalo i . Las restricciones de capacidad mutua multiartículo (13) se refieren a los volúmenes embalsados \bar{v}_l y a las capacidades de descarga \bar{d}_l . Debe notarse que para encontrar un punto inicial factible respecto a las restricciones (12,13) debe disponerse de una rutina de flujos multiartículo, como la descrita en [19].

Siendo \mathcal{E} el conjunto de índices correspondientes a las unidades térmicas pertenecientes a la *compañía eléctrica específica* que optimiza su producción a largo plazo y \mathcal{M} el conjunto de índices correspondientes a las generaciones hidráulicas en embalse de la misma compañía, la restricción (18) expresa, para un cierto número $N_{\tilde{\gamma}}$ de intervalos un porcentaje $\theta_{\tilde{\gamma}}$ mínimo deseado de participación en el mercado (p.e. $\theta_{\tilde{\gamma}}=0.3$). Esta es la única restricción especial para la citada compañía.

Las N_n restricciones de no recubrimiento (19) son aquellas distintas de las de recubrimiento (11) a ser satisfechas por las generaciones, p.e., un consumo mínimo anual de gas, las restricciones asociadas a las unidades de ciclo combinado, etc..

Finalmente la no negatividad de las variables se expresa en (20).

2.1.4 Ventajas de las formulaciones anteriores no presentes en otras formulaciones

La formulación anterior es más compleja que las formulaciones alternativas existentes pero es mucho más precisa y potente que otras formulaciones y tiene unas claras ventajas sobre éstas:

- La principal ventaja de esta formulación es la inclusión de las restricciones de recubrimiento (11), las cuales hacen que para cada intervalo i las generaciones térmicas E_j^i y las hidráulicas (de cada artículo k) $h_{k,l}^i$ constituyan un recubrimiento probabilístico de la monótona de cargas del intervalo. Sin estas restricciones:
 - ni las energías E_j^i y $h_{k,l}^i$ constituirían los valores esperados que corresponden al recubrimiento de la monótona,
 - ni sería posible tener en cuenta el efecto del valor esperado de la energía externa, que es fundamental para estimar correctamente el coste de la producción
- Otra ventaja importante es el empleo de la formulación multiartículo para la representación de la estocasticidad hidráulica, la cual, junto al modelo de recubrimiento basado en las ecuaciones de Bloom y Gallant, da pie a la optimización conjunta de la generación térmica e hidráulica.
- Existen algoritmos eficientes para resolver el problema propuesto como lo prueban los resultados alcanzados con la parte sólo térmica [105], con el modelo multiartículo [95] y con el modelo hidrotérmico sin todas las restricciones de recubrimiento [98], por lo que es de esperar que la resolución conjunta será también eficiente (en tiempo de CPU y memoria requerida).
- La formulación propuesta admite la aplicación de métodos de punto interior (requiriendose una especialización para el caso de restricciones de desigualdad a base de conjuntos activos, i la linealización sucesiva de la no linealidad en el término $g_{\omega}^i(\tilde{H}^i)$ de (11) y en los sumandos $h_{k,l}(v_{k,l}^{i-1}, v_{k,l}^i, d_{k,l}^i)$ de (14)).

2.1.5 Procedimiento de Datzig-Wolfe para resolver la formulación con hidráulica simplificada

La formulación con hidráulica simplificada (1–9) puede ser reescrita como:

$$\text{minimizar}_{E_j^i} \quad \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{\tilde{u}}} f_j E_j^i \quad (21)$$

$$\text{sujeto a:} \quad \sum_{j \in \omega} E_j^i \leq \widehat{E}^i - W^i(\omega) \quad \forall \omega \in \Omega \quad \forall i \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{\tilde{u}}} A_{jl}^i E_j^i = b_l, \quad l = 1, \dots, N_m \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{\tilde{u}}} A_{jk}^i E_j^i \geq b_k, \quad k = 1, \dots, N_n \quad (24)$$

$$E_j^i \geq \underline{0} \quad j=1, \dots, N_{\tilde{u}}, \quad \forall i \quad (25)$$

Aquí, las generaciones de la hidráulica propia $\widetilde{H}_{\mathcal{M}}^i$ y ajena $\widetilde{H}_{\mathcal{N}}^i$ se representan como una más de las unidades de generación, cuyo número total es ahora $N_{\tilde{u}}$. Las restricciones (3,5, y 7) son del tipo (24), y las (4 y 6) son del tipo (23).

Las restricciones (22 y 25) definen, para cada intervalo, un poliedro del cual podemos obtener fácilmente los vértices [3, 18, 105]. El procedimiento de Dantzig-Wolfe expresa las variables E_j^i como una combinación convexa de todos los vértices V_k^i del poliedro del intervalo i :

$$E^i = \Lambda^{i'} V^i, \quad \Lambda^i \geq \underline{0}, \quad \mathbb{I}' \Lambda^i = 1 \quad \forall i$$

siendo $\mathbb{I}' = [1 \ 1 \ \dots \ 1]$ un vector de unos.

El problema anterior puede ser reexpresado como:

$$\text{minimizar}_{\Lambda^i} \quad \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{\tilde{u}}} f_j \Lambda^{i'} V_j^i \quad (26)$$

$$\text{sujeto a:} \quad \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{\tilde{u}}} A_{jl}^i \Lambda^{i'} V_j^i = b_l, \quad l = 1, \dots, N_m \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{\tilde{u}}} A_{jk}^i \Lambda^{i'} V_j^i \geq b_k, \quad k = 1, \dots, N_n \quad (28)$$

$$\Lambda^i \geq \underline{0}, \quad \mathbb{I}' \Lambda^i = 1 \quad \forall i \quad (29)$$

el cual es lineal en Λ^i y se presta a ser resuelto por el sistema de generación de columnas de Dantzig-Wolfe [24], tal como se ha hecho en [109].

2.2 Coordinación Hidrotérmica a Corto Plazo de la generación eléctrica en un entorno competitivo

2.2.1 Finalidad del proyecto

El problema de Coordinación Hidro-Térmica a Corto Plazo en un entorno de mercado trata de resolver los problemas de toma de decisiones de una empresa eléctrica que debe decidir cual es la planificación óptima de la producción de energía eléctrica de sus generadores para periodos que van de un día a una semana. Esta planificación debe realizarse de acuerdo con las estrategias marcadas por la planificación a largo plazo, aunque, el aspecto dominante en este tipo de planificación a corto plazo es la *dinámica del mercado diario de energía*.

La desregularización del mercado eléctrico español a partir de enero de 1998 ha planteado a las compañías eléctricas un problema completamente diferente al existente previamente. En la situación

previa a la desregularización estas debían preocuparse casi exclusivamente de la reducción de los costes de producción de su parque de generación de forma que se cumpliera con la demanda de energía prevista. La formulación y resolución de este problema, conocido como el problema de *Coordinación Hidro-Térmica a Corto Plazo (CHTCP)* ha sido estudiada por nuestro Grupo Investigador. Sin embargo los modelos de (CHTCP) no son operativos en el actual marco de mercado energético donde el principal problema de cada compañía consiste en el cálculo de la cantidad de energía a ofertar al operador de mercado y su precio.

Los agentes que participan en el mercado energético (compañías de generación, de consumo, de servicios, de transmisión y de distribución), así como los operadores de mercado y de red se enfrentan a problemas de optimización diferentes de los planteados con anterioridad. A pesar de la gran diversidad de problemas existentes en el nuevo entorno competitivo (ver [22]), la mayoría de ellos pueden ser resueltos a partir de la adaptación de modelos ya existentes de (CHTCP). En particular, la adaptación del modelo (MACH), desarrollado por nuestro grupo en los anteriores proyectos CICYT TAP96-1044 y TAP1999-1075-C02 al nuevo entorno competitivo puede aportar las ventajas inherentes a este modelo que se describirán más adelante.

En resumen, la finalidad de este proyecto, en referencia al apartado de Coordinación Hidro-Térmica a Corto Plazo es:

1. Desarrollar el modelo (MACH-M), adaptando el modelo (MACH) de Coordinación Hidro-Térmica a Corto plazo a los nuevos problemas de optimización que afectan a los distintos agentes del mercado, con especial interés por los problemas que afectan a las compañías de generación. Un aspecto fundamental en el modelo (MACH-M) consistirá en la inclusión de restricciones que permitan tener en cuenta los resultados obtenidos en la coordinación a largo plazo.
2. Desarrollar nuevas técnicas de optimización que permitan resolver de forma eficiente los nuevos modelos formulados.
3. Obtener implementaciones computacionales eficientes de las técnicas de optimización desarrolladas.

2.2.2 Antecedentes

Durante el desarrollo de los proyectos CICYT TAP96-1044 y TAP1999-1075-C02, el Grupo de Investigación ha puesto a punto el llamado *Modelo Acoplado de Coordinación Hidro-Térmica (MACH)* [21, 62, 10, 6, 12]. La representación matemática de este modelo es:

$$\left. \begin{array}{l} \min \quad f(x) = c(x) + \tilde{c}(x) \\ s.t. \quad x \in \mathcal{D} \\ \quad \quad x \in \tilde{\mathcal{D}} \end{array} \right\} \quad (30)$$

donde:

- x representa el vector de variables que describen el estado de las unidades de generación, hidráulicas y térmicas (volúmenes, descargas y bombeos de los embalses, generación y reserva rodante de las centrales térmicas, flujos de potencia en las líneas de la red de distribución, etc.).
- $c(x)$ representa la función de *costes de generación* y distribución de la energía, básicamente combustible consumido.
- $\tilde{c}(x)$ representa los *costes de mantenimiento y gestión* asociado a los arranques/paradas de las unidades térmicas.
- El dominio \mathcal{D} se define a través de una serie de restricciones que *acoplan* el parque térmico, hidráulico y la red de distribución: restricciones de cubrimiento de la carga horaria, restricciones de reserva rodante, restricciones asociadas al modelo dc de la red de distribución, restricciones medioambientales, etc. Este dominio define un conjunto factible conexo pero que, en general es no convexo.

- El dominio $\tilde{\mathcal{D}}$ está definido por todas las restricciones de funcionamiento de los generadores térmicos, básicamente tiempos mínimos de conexión y desconexión de la red. Este dominio de definición es no conexo, y admite una formulación equivalente a través de incorporación de variables binarias.

Las características que hacen destacar el modelo (**MACH**) sobre otros modelos existentes descritos en la bibliografía del área son:

1. Permite la optimización conjunta del los sistemas hidráulico, térmico y de transporte (es decir, no considera tan solo una restricción de carga por intervalo sino que incluye explícitamente un modelo *dc* de la red de transporte.
2. El estado de las unidades térmicas, incluyendo su reserva rodante incremental y decremental, es representado mediante un modelo de flujos en redes basado en la *Red Térmica Equivalente*. Esto permite una resolución eficiente del problema (30) en la que es posible usar técnicas especializadas de flujos en redes.

2.2.3 Estado actual de los conocimientos científico-técnicos

El corpus de conocimiento científico relevante para este proyecto es aquel que hace referencia a la formulación de *modelos de optimización para agentes del mercado eléctrico* y a las técnicas de *optimización no lineal mixta de grandes dimensiones*, necesarias para resolver el problema (30).

Modelos de optimización para agentes del mercado eléctrico. Existen diferentes propuestas para abordar la resolución de los problemas de toma de decisiones existentes en el mercado energético. El principal escollo en este tipo de modelos consiste en el tratamiento de la estocasticidad del precio de mercado de la energía. Algunos autores plantean la aplicación de la teoría de juegos al estudio de la mejor estrategia a seguir para las diferentes compañías que compiten en el mercado [70, 29]. Otros autores proponen la formulación de modelos de optimización donde la variabilidad de los precios se incorpora a través de la llamada *curva de los competidores*, que proporciona el precio del MWh en función de la cuota de mercado de los competidores [37]. En [17] se propone una aproximación de los precios de mercado mediante técnicas de *series temporales*.

Optimización no lineal mixta de grandes dimensiones. El problema (30) es un problema de optimización no lineal mixta de grandes dimensiones. Estos problemas han sido abordados en la literatura mediante técnicas de optimización dual, consistentes en la formulación del problema dual Lagrangiano de (30). Las técnicas de resolución de este problema se dividen en una primera gran familia que usan una relajación Lagrangiana clásica, ya sea mediante algoritmos *subgradiente* [76, 120], *Cutting-Plane* o *Bundle* [71], o, más recientemente, mediante *Analytic Center Cutting-Plane Methods* (ACCPM) [75]. La otra gran familia es aquella que plantea una *relajación Lagrangiana Aumentada* [4, 2, 10, 12]

2.2.4 Logros anteriores del proyecto

El problema (30), planteado para el conjunto completo de generadores de una compañía eléctrica, es un problema de optimización no lineal mixto de gran escala. El método de resolución de dicho problema desarrollado a lo largo de los últimos años, iniciado en el marco del proyecto CICYT TAP96-1044 y, desarrollado fundamentalmente en el proyecto TAP1999-1075-C02 se basa en la técnica de *Duplicación de Variables*. Mediante esta técnica se separan los dos dominios \mathcal{D} y $\tilde{\mathcal{D}}$ formulándose el problema auxiliar ($x \in R^n, \tilde{x} \in R^n$):

$$\left. \begin{array}{l} \min \quad f(x) = c(x) + \tilde{c}(\tilde{x}), \\ s.t. \quad x \in \mathcal{D}, \quad \tilde{x} \in \tilde{\mathcal{D}}, \\ \quad \quad x - \tilde{x} = 0. \end{array} \right\} \quad (31)$$

La relajación Lagrangiana de las restricciones de acoplamiento $x - \tilde{x} = 0$ permite descomponer este problema en dos subproblemas, uno en D y el otro en \tilde{D} . De esta forma se obtiene el dual Lagrangiano de (30):

$$\max_{\lambda \in R^n} q(\lambda) \quad (32)$$

donde la función dual $q(\lambda)$ es:

$$q(\lambda) := \left\{ \min_{\substack{x \in \mathcal{D} \\ \tilde{x} \in \tilde{\mathcal{D}}}} L(x, \tilde{x}, \lambda) = c(x) + \tilde{c}(\tilde{x}) + \lambda'(x - \tilde{x}) \right\} \quad (33)$$

El trabajo previo realizado en el proyecto CICYT TAP1999-1075-C02 se ha centrado en la resolución del problema (32) mediante técnicas subgradiente y de Lagrangianos aumentados. En concreto:

- Dentro del entorno de los métodos subgradiente, se ha desarrollado un nuevo método de actualización de las variables duales llamado el método *Radar Subgradient* [10, 8]
- Dentro del área de los métodos de Lagrangiana aumentada, se ha desarrollado un nuevo método de descomposición del término cuadrático de la Lagrangiana aumentada, el *Descenso Coordinado por Bloques* [10, 12].
- Se ha propuesto un nuevo método dual de dos fases, el *Radar Multiplier*: en la primera fase se aplica un método Radar Subgradient, obteniéndose una cota global inferior al valor óptimo de la función dual y un valor inicial de las variables duales a partir del cual se aplica un método de Lagrangiana aumentada que obtiene un máximo local de la función dual, cuyo solución primal asociada es factible [6].
- Se han desarrollado técnicas de optimización de flujos no lineales en redes para la resolución del subproblema Lagrangiano (33) [59], así como técnicas de punto interior [111].

Asimismo, se ha puesto a punto las aplicaciones informáticas MACH1 y MAPH5.2 [60, 61] que implementa las técnicas desarrolladas en [10, 6, 12, 8]. El código MACH1 permite resolver el problema (MACH), aunque con un modelo más sencillo de sistema de generación, mientras que el código MAPH5.2 no permite optimizar el estado on/off de las unidades térmicas, pero el modelo que implementa es más detallado. El código MAPH5.2 puede ser ejecutado telemáticamente a través de la página <http://www-manog.upc.es>.

Resolución del modelo MAPH mediante métodos de multiplicadores

Un apartado importante dentro de la optimización del modelo (MACH) consiste en la resolución del subproblema Lagrangiano definido en (32). Este problema lagrangiano puede descomponerse en un subproblema por cada unidad de generación térmica más un problema correspondiente a un *Modelo Acoplado de Planificación Hidrotérmica MAPH*, descrito en [62], que puede formularse como:

$$\text{minimizar} \quad f(x) \quad (34)$$

$$\text{sujeeto a:} \quad Ax = r \quad (35)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (36)$$

$$0 \leq x \leq \bar{x} \quad (37)$$

y donde $g = (g_1, \dots, g_r)$, se han utilizado técnicas de Lagrangianos aumentados, relajando las restricciones que no son de red (36) y aprovechando la alta eficiencia de los algoritmos de flujos en redes no lineales para resolver la sucesión de subproblemas de red:

$$\text{minimizar}_x \quad L_\rho(x, \mu) = f(x) + \frac{1}{2}\rho \sum_{i=1}^r \{(\max\{0, \mu_i + \rho g_i(x)\})^2 - \mu_i^2\} \quad (38)$$

$$\text{sujeeto a} \quad x \in \mathcal{F} \quad (39)$$

donde $\mathcal{F} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid Ax = r, 0 \leq x \leq u\}$ es el conjunto factible. En estas técnicas un aspecto de trascendental importancia es la maximización de la función dual

$$q(\mu) = \inf_{x \in \mathcal{F}} \{L_\rho(x, \mu)\}$$

mediante convenientes actualizaciones del vector μ , dado que una buena estimación de μ^* (óptimo del problema dual) acelera significativamente la convergencia del método. En vista de ello se han desarrollado diferentes técnicas [85, 86, 90, 91, 89, 84, 83] que permiten obtener estimaciones de μ^* orden lineal y superlineal dando lugar al paquete PFNRN03 [77]. La eficiencia y robustez de este paquete ha quedado demostrado mediante un amplio número de pruebas computacionales sobre problemas en redes de gran escala en las que ha sido contrastada su eficiencia con la de los paquetes NOXCB [67] y MINOS 5.3 y 5.5 [94], ver [85] (en dicha referencia sólo se usa estimación de orden lineal). El problema de mayor tamaño tenía 18000 arcos, 3000 nodos y 150 restricciones laterales no lineales fue resuelto por PFNRN03 en un minuto y medio mediante una combinación de procedimientos de orden lineal y superlineal [84].

Durante la resolución del modelo **MAPH** mediante métodos de multiplicadores que usan el Jacobiano de las restricciones laterales (36) para obtener una estimación del vector de multiplicadores de Lagrange de dichas restricciones, se presenta una dificultad cuando el problema concreto a resolver es degenerado. Un problema se dice que es degenerado si los gradientes de las restricciones activas en la solución son linealmente dependientes y/o la condición de complementariedad estricta no se cumple. Una posible consecuencia de la dependencia de dichos gradientes es que la proyección del Jacobiano de (36) sobre las restricciones de red activas (35) sea de rango deficiente en un entorno de la solución, lo cual impide el uso de dichos estimadores, o cuando menos hace disminuir su fiabilidad debido a problemas de mal condicionamiento, poniendo en peligro la convergencia global del algoritmo. Esta dificultad no sólo afecta a la resolución de **MAPH** mediante métodos de multiplicadores, sino que también afecta a los métodos de punto interior o de Lagrangianos proyectados. Una forma inicial de enfocar este problema es analizar los métodos utilizados para resolver esta dificultad en el uso de otras técnicas, por ejemplo las variantes sugeridas por Stephen J. Wright para el algoritmo de programación cuadrática secuencial [125], y en el caso de que sea trasladable a los métodos de multiplicadores que usamos, modificar adecuadamente los algoritmos asociados. Obviamente, otro tanto se puede intentar hacer para el caso de los métodos de Lagrangianos proyectados y de los de punto interior.

Otro importante inconveniente a tener en consideración al resolver **MAPH** es la posible no diferenciabilidad de la función dual por lo cual en la estimación del óptimo del dual (μ^*) también serán tenidos en consideración métodos de optimización no diferenciable como el método del subgradiente, ver [16, 82].

Según se indica más arriba, los métodos de mutiplicadores aplicados en combinación con técnicas de reducción de variable especializados para redes han demostrado ser eficientes y robustos en la práctica, tanto para problemas artificiales como para problemas reales de Coordinación Hidrotérmica a Corto Plazo de la Generación de Energía Eléctrica. Merece la pena por tanto evaluar su eficiencia comparándola con la de otros códigos existentes, capaces también de resolver este tipo de problemas. En consecuencia, se comparará computacionalmente el código PFNRN, además de con MINOS y NOXCB, también con SNOPT [38], LANCELOT [23] y LOQO [123, 124], accesibles en la web del servidor para Optimización denominado NEOS, usando el lenguaje de modelización AMPL para la entrada de datos.

Resolución del modelo **MAPH** mediante técnicas de optimización global

El resultado de aplicar técnicas de optimización global a problemas de planificación hidrotérmica de tamaño reducido, de hasta 30 variables, nos ha llevado a la conclusión de que, en todos los casos, la solución encontrada por MINOS, dentro de la precisión establecida, es la óptima. Todo ello nos ha dado una confirmación directa de los buenos resultados obtenidos por MINOS hasta el momento. En este punto nos proponemos, para completar nuestro trabajo, varios objetivos que cumplir. Por un lado, mejorar las técnicas utilizadas hasta el momento de manera que podamos resolver eficazmente los problemas de tamaño mediano, y confirmar, si es posible, para dimensiones mayores, los resultados

ya obtenidos. Pensamos que, entre otras que puedan ir apareciendo en el desarrollo de la investigación, las mejoras deben consistir:

- Una mayor eficiencia de los procedimientos de branch and bound, relacionados con los problemas de optimización global, via la mejora de las técnicas de subdivisión asociadas a los mismos ([28] and [121]).
- Desarrollar procedimientos que permitan eliminar las restricciones innecesarias ya que en general las técnicas de optimización global llevan asociada la resolución de subproblemas lineales en los que el número de restricciones se incrementa en gran manera a lo largo del procedimiento ([69], [68], [72] and [122]).
- Implementar procedimientos de programación en paralelo ya que, en cada iteración, es necesario resolver una cierta cantidad de subproblemas lineales simultáneamente. Esta cantidad depende de las técnicas de subdivisión, anteriormente mencionadas, y varía a lo largo de la ejecución del programa.
- Desarrollar procedimientos combinados de técnicas clásicas de optimización local y técnicas optimización global. De manera que utilizemos las primeras para obtener óptimos locales y las segundas para trascenderlos ([119]).

Por otro lado, y una vez conseguidos los objetivos mencionados anteriormente, proponernos un nuevo objetivo consistente en utilizar las técnicas mejoradas de optimización global para resolver problemas de planificación hidrotérmica con bombeo. Para este tipo de problemas, que son, en algunos casos, claramente no convexos e incluso discontinuos, disponemos de modelos de tamaño medio y grande en los que la solución encontrada por MINOS es, sin lugar a dudas, un mínimo local. El resultado de aplicar las técnicas mejoradas de optimización global a estos nuevos modelos de planificación hidrotérmica con bombeo nos dará una medida de su eficacia. Observemos que las técnicas de optimización global son técnicas de aproximación y, a medida que aumenta la precisión de la solución, de un alto coste computacional. Es por todo ello que su eficacia no puede medirse en términos de una solución muy precisa sino, en términos de su capacidad para trascender, con un coste computacional razonable, los óptimos locales y obtener una mejor solución del problema. En muchos problemas reales, en particular los de planificación hidrotérmica, la mejora de un óptimo local tiene un valor económico indudable que justifica, sin más, el estudio de este tipo de procedimientos.

3 Objetivos del proyecto

3.1 Objetivos en el área de largo plazo para el nuevo Proyecto

Actualmente se dispone de dos programas de coordinación a largo plazo, ambos basados en la metodología de Bloom y Gallant [18] de recubrimiento de una monótona de cargas en presencia de restricciones, extendida a problemas multi-intervalo:

- ★ El llamado MIBG [105] que emplea el procedimiento del conjunto activo para hallar el óptimo en presencia de restricciones uni o multi-intervalo, utilizando una representación simplificada de la generación hidráulica (ha sido ya probado con éxito para problemas de tamaño medio), y
- ★ El llamado BGGEV que emplea el procedimiento de generación de vértices de Dantzig-Wolfe para solucionar el problema con restricciones uni o multi-intervalo [109], utilizando una representación simplificada de la generación hidráulica. Este programa está actualmente siendo depurado y comparado con el anterior MIBG.

Se dispone de una página web donde estan los programas desarrollados y datos de prueba para poderlos probar a disposición de los EPO (Entes Promotores y/o Observadores). Los objetivos son:

- **(OL.grn)** Probar los códigos MIBG y BGGEV con problemas grandes, con datos de una compañía y de todas las compañías competidoras (en forma semiagregada) del mercado. (Para ello requerimos ayuda a los EPOs en la obtención de los datos requeridos.)
- **(OL.hid)** Desarrollar la versión de generación hidráulica detallada del código MIBG i comparar sus resultados con los de la versión con generación hidráulica simplificada.
- **(OL.ipa)** Desarrollar la versión IPMIBG del código MIBG utilizando técnicas de punto interior para conjunto activo, la cual podría ser notablemente más eficiente que los procedimientos clásicos de conjunto activo.
- **(OL.dif)** Conocer y analizar los detalles de la problemática de largo plazo de los EPOs e intentar aportar soluciones a través de los desarrollos a efectuar, y depositar en la página web del grupo de investigación los ejecutables de los programas desarrollados y un conjunto de datos para que los EPOs, u otras empresas interesadas, puedan valorar las prestaciones de los desarrollos efectuados.

3.2 Objetivos en el área de corto plazo para el nuevo Proyecto

El objetivo genérico del proyecto a corto plazo consiste en *la obtención de aplicaciones informáticas de apoyo a la decisión de las compañías de generación de energía eléctrica en la planificación de su producción energética dentro del mercado diario español*. Este objetivo genérico se estructurará en tres áreas, la de *formulación de los modelos de optimización* adecuados al problema planteado, la de *desarrollo de algoritmos de optimización* apropiados a los modelos formulados y, finalmente, la de *obtención de implementaciones computacionales eficientes* de los modelos y algoritmos propuestos. El detalle de estos objetivos se describe a continuación.

3.2.1 Objetivos referentes a la formulación de modelos de optimización

- Estudio de los diferentes modelos de optimización propuestos para la planificación de la producción de energía eléctrica en entornos competitivos, con especial énfasis en los modelos de interés a las compañías de generación.
- Formulación de un modelo de optimización de la producción eléctrica y del precio ofertado en el mercado energético diario, basado en el modelo **(MACH)** descrito en (30). Se programará con el lenguaje de modelización AMPL un modelo prototipo.

3.2.2 Objetivos referentes a la previsión del precio de mercado

- Modelización de la serie temporal que se obtiene a partir del indicador del precio de la energía eléctrica
- Comparación con el resto de los indicadores relevantes (energía total negociada en la casación, cuota de mercado,...), de los modelos y de las previsiones obtenidas en el objetivo anterior.
- Se implementaran y desarrollaran los algoritmos necesarios que permitan la estimación de los parámetros utilizando tanto la metodología Box-Jenkins como la que se deduce de la formulación en espacio de estado de una serie temporal.
- Analizadas las diferentes metodologías, finalmente se propondrá aquella que proporciona previsiones más precisas, en el sentido de minimizar el error cuadrático medio y mejor se adapta a la evolución futura de los indicadores especificados.

3.2.3 Objetivos referentes al desarrollo de algoritmos de optimización

- Se abordará la resolución de los modelos de optimización obtenidos mediante diversas técnicas de optimización dual.
- Se adaptarán las técnicas desarrolladas por el grupo en la resolución del problema (**MACH**) al nuevo modelo, básicamente los métodos *Radar Multiplier* y *Radar Subgradient*.
- Se compararán las técnicas mencionadas en el anterior apartado con otras técnicas existentes, con especial interés en los métodos *Analityc Center Cutting Plane Method*.
- Se estudiará la resolución eficiente del subproblema Lagrangiano (33) mediante técnicas especializadas de flujos en redes y punto interior.
- Se abordará la resolución del problema (**MAPH**) mediante técnicas de optimización global.

3.2.4 Obtención de implementaciones computacionales eficientes

- Creación del código `mach-m` por integración de los códigos actuales `maph5.2` i `mach1`.
- Elaboración de una bateria de pruebas con los datos proporcionados por los EPOs
- Resolución de la bateria de pruebas con el código elaborado.
- Preparación del código elaborado para ser ejecutado desde la página web del grupo.

4 Metodología y Plan de Trabajo.

4.1 Coordinación a Corto Plazo

4.1.1 Tareas referentes a la formulación de modelos de optimización

Personal F. Javier Heredia, becario.

Tareas

OC.For.1 Revisión bibliográfica.

OC.For.2 Formulación de la modificación del modelo (**MACH**) que incluya un modelo de mercado (**(MACH-M)**).

OC.For.3 Obtención de una implementación prototipo en **AMPL** del modelo desarrollado.

Recursos necesarios Documentación acceso a bases bibliográficas; petición de copias de artículos; **Software** paquetes informáticos (**L^AT_EX**; **AMPL**); **Hardware** ordenador personal/servidor; **Difusión**: viajes a congresos.

Producción prevista diversos informes técnicos; presentación de los resultados a un congreso internacional; en función de la calidad de los resultados, publicación de un artículo en una revista indexada.

4.1.2 Tareas referentes a la previsión del precio de mercado

Personal M. Pilar Muñoz.

Tareas

OC.Prev.1 Identificación del modelo adecuado para las series temporales.

OC.Prev.2 Estimación de los parámetros propuestos en la identificación

OC.Prev.3 Verificación del modelo vía el análisis de los residuos.

Recursos necesarios Documentación acceso a bases bibliográficas; petición de copias de artículos; **Software** paquetes informáticos; **Hardware** ordenador personal/servidor; **Difusión**: viajes a congresos.

Producción prevista diversos informes técnicos; presentación de los resultados a un congreso internacional; en función de la calidad de los resultados, publicación de un artículo en una revista indexada.

4.1.3 Tareas referentes a los objetivos sobre el desarrollo de algoritmos de optimización para el modelo (**MACH-M**)

Personal F. Javier Heredia, César Beltran, Eugenio Mijangos, becario.

Tareas

OC.Opt.1 Estudio de la aplicación de los métodos Radar Multiplier (RM) y Analytic Center Cutting Plane Method (ACCPM) al modelo (**MACH-M**).

OC.Opt.2 Implementación de los métodos RM y ACCPM en el prototipo **AMPL** del modelo (**MACH-M**).

OC.Opt.3 Definición de un conjunto de datos de prueba de tamaño pequeño a mediano y comparación de la eficiencia de los métodos RM i ACCPM. Determinación del método más eficiente.

Recursos necesarios Documentación acceso a bases bibliográficas; petición de copias de artículos; **Hardware**: servidor de cálculo, PC's portátiles/sobremesa; **Software**: SO Linux, **AMPL**, **MATLAB**, **NAG Library**; **Difusión**: viajes a congresos

Table 1: cronograma tareas de Coordinación a Corto Plazo

Tareas	Centro Ejecutor	Persona responsable y otras involucradas	1er año		2o año		3er año	
			S1	S2	S1	S2	S1	S2
OC.For.1	UPC	F.J. Heredia	X					
OC.For.2	UPC	F.J. Heredia	X	X				
OC.For.3	UPC	F.J. Heredia, becario	X	X				
OC.Prev.1	UPC	M.P. Muñoz	X					
OC.Prev.2	UPC	M.P. Muñoz		X				
OC.Prev.3	UPC	M.P. Muñoz			X			
OC.Opt.1	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran			X			
OC.Opt.2	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran, becario			X	X		
OC.Opt.3	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran, becario				X		
OC.Imp.1	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran, becario					X	
OC.Imp.2	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran, becario					X	
OC.Imp.3	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran, becario						X
OC.Imp.4	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran, becario						X
OC.Imp.5	UPC	F.J. Heredia, C. Beltran, becario						X
OC.Imp.6	UPC	M.P. Muñoz, becario					X	X

Producción prevista diversos informes técnicos; presentación de los resultados a congresos internacionales; en función de la calidad de los resultados, publicación de uno o más artículos en una revistas indexadas.

4.1.4 Tareas referentes los objetivos sobre la obtención de implementaciones computacionales eficientes

Personal F. Javier Heredia, César Beltran, becario.

Tareas

OC.Imp.1 Obtención del código `mach-m` por fusión de los códigos `mach1` y `maph5.2`.

OC.Imp.2 Implementación del método más eficiente determinado en `OC.Opt.3` (RM o ACCPM) en el código `mach-m`.

OC.Imp.3 Adaptación de los datos proporcionados por los EPOs al formato propio del código `mach-m` (formato `.mad`).

OC.Imp.4 Resolución de los problemas proporcionados por los EPOs y validación del modelo.

OC.Imp.5 Desarrollo de la aplicación para la ejecución telemática del código `mach-m` desde la página web del grupo.

OC.Imp.6 Implementación en el código `mach-m` de un módulo de previsión del precio de mercado.

Recursos necesarios **Hardware:** servidor de cálculo, PC's; **Software:** SO Linux, compiladores C++ i Fortran 77/90, debugger, optimizadores (MINOS, CPLEX, ACCPM), herramientas de desarrollo de páginas web bajo Linux.

Producción prevista diversos informes técnicos; presentación de los resultados a congresos internacionales; en función de la calidad de los resultados, publicación de uno o más artículos en una revistas indexadas.

Table 2: cronograma tareas de Métodos de Multiplicadores en Redes

Tareas	Centro Ejecutor	Persona responsable y otras involucradas	1er año		2o año		3er año	
			S1	S2	S1	S2	S1	S2
OC.mmr.1	UPV, UPC	E. Mijangos, N. Nabona	×	×				
OC.mmr.2	UPV, UPC	E. Mijangos		×	×			
OC.mmr.3	UPV, UPC	E. Mijangos			×			
OC.mmr.4	UPV, UPC	E. Mijangos				×		
OC.mmr.5	UPV, UPC	E. Mijangos					×	
OC.mmr.6	UPV, UPC	E. Mijangos, N. Nabona					×	×

4.2 Métodos de multiplicadores sobre redes

- Personal asignado: Narcís Nabona y Eugenio Mijangos.
- Objetivos:

OC.mmr.1.- Comparación de la eficiencia del código PFNRN con la de NOXCB, MINOS, LOQO, SNOPT y LANCELOT.

▷ Redacción de un Report de Investigación y, en función de los resultados, un artículo.

OC.mmr.2.- Profundización en la investigación sobre la aplicación de los métodos del subgradiente en la resolución del problema **MAPH** mediante métodos de multiplicadores combinados con técnicas de reducción de variable para redes.

▷ Diseño y desarrollo de su implementación computacional.

▷ Evaluación computacional de estas técnicas.

OC.mmr.3.- Redacción de un Report de Investigación y, en función de los resultados, un artículo.

OC.mmr.4.- En lo que respecta al inconveniente del Jacobiano de rango deficiente en un entorno de la solución de algunos problemas degenerados:

▷ Estudio de las variantes sugeridas por Stephen J. Wright para el algoritmo de programación cuadrática secuencial [125].

▷ Extensión del mismo para los métodos de multiplicadores que utilizan dicho Jacobiano en la estimación de los multiplicadores.

▷ Descripción de su aplicación a problemas **MAPH**.

▷ Redacción de un Report de Investigación.

OC.mmr.5.- Diseño y desarrollo de su implementación computacional.

OC.mmr.6.- Evaluación computacional de estas técnicas en la resolución de problemas de Planificación Hidrotérmica de grandes dimensiones.

▷ Redacción de un Report de Investigación y, en función de los resultados, un artículo.

▷ En función de los resultados, sesión de demostración.

- Recursos: recursos bibliográficos (OC.mmr.2, OC.mmr.4), ordenadores propios (OC.mmr.3, OC.mmr.4, OC.mmr.5, OC.mmr.6) y adquiridos (OC.mmr.1, OC.mmr.2, OC.mmr.6); paquetes de optimización PFNRN03, NOXCB, MINOS (OC.mmr.1, OC.mmr.2, OC.mmr.6). En función de los resultados, presentación a congresos.
- Plan de trabajo:

4.3 Optimización Global

La distribución por semestres a lo largo de tres años es la siguiente:

Semestre	tec.sdvv	elim.rest.	prg.paral.	pcd.comb.	pro.bomb.
1	X	X			
2	X	X		X	
3	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X
5			X	X	X
6			X		X

con

- **tec.sdvv.:** Mejora de las técnicas de subdivisión asociadas los procedimiento de branch and bound
- **elim.rest.:** Desarrollo de procedimientos que permitan eliminar las restricciones innecesarias.
- **prg.paral.:** Implementación de procedimientos de programación en paralelo.
- **pcd.comb.:** Desarrollo de procedimientos combinados de técnicas clásicas de optimización local y técnicas optimización global.
- **pro.bomb.:** Utilización de las técnicas mejoradas de optimización global para resolver problemas de planificación hidrotérmica con bombeo.

4.4 Coordinación a largo plazo

Las tareas a efectuar se corresponden con los objetivos propuestos:

- Para el objetivo **OL.grn:** Probar los códigos MIBG y BGGEV con problemas grandes, con datos de una compañía y de todas las compañías competidoras (en forma semiagregada) del mercado, se preveen dos subtareas: 1) recolección de datos y codificación en los formatos establecidos, y 2) prueba de los programas (y eventualmente corrección de errores que se observen) con los códigos disponibles.
- Para el objetivo **OL.hid:** Desarrollar la versión de generación hidráulica detallada del código MIBG i comparar sus resultados con los de la versión con generación hidráulica simplificada. Se preveen tres subtareas: 1) desarrollo del procedimiento de encontrar un punto inicial factible respecto a las variables hidráulicas, 2) extensión de la optimización a las variables hidráulicas, y 3) pruebas y refinamiento del procedimiento.
- Para el objetivo **OL.ipa:** Desarrollar la versión IPMIBG del código MIBG utilizando técnicas de punto interior para conjunto activo, se preveen cuatro subtareas: 1) estudio de los procedimientos de conjunto activo en punto interior [44, 53], 2) desarrollar el código de punto interior con conjunto activo con reinicialización del punto al cambiar el conjunto activo, para un problema general, 3) adaptación del código anterior al problema de coordinación de largo plazo con hidráulica simplificada, y 4) extensión al caso de hidráulica detallada y refinamiento del código.
- Para el objetivo **OL.dif:** Conocer y analizar los detalles de la problemática de largo plazo de los EPOs e intentar aportar soluciones a través de los desarrollos a efectuar, y depositar en la página web del grupo de investigación los ejecutables de los programas desarrollados y un conjunto de datos, se preveen dos subtareas: 1) adaptaciones de desarrollos efectuados a particularidades expresadas por EPOs, y 2) depósito de códigos en la página web del grupo.

Los resultados a obtener, según tareas, serían:

Table 3: cronograma tareas de Coordinación a Largo Plazo

Tareas	Centro Ejecutor	Persona responsable y otras involucradas	1er año		2o año		3er año	
			S1	S2	S1	S2	S1	S2
OL.grn.1	UPC	N. Nabona, becario	×	×				
OL.grn.2	UPC	N. Nabona, becario			×	×		
OL.hid.1	UPC	N. Nabona, doctorando	×	×				
OL.hid.2	UPC	N. Nabona, doctorando			×	×		
OL.hid.3	UPC	N. Nabona, doctorando					×	
OL.ipa.1	UPC, Un. Edin.	N. Nabona, J. Gondzio, doctorando	×					
OL.ipa.2	UPC, Un. Edin.	N. Nabona, J. Gondzio, doctorando		×	×			
OL.ipa.4	UPC, Un. Edin.	N. Nabona, J. Gondzio, doctorando				×	×	
OL.ipa.4	UPC, Un. Edin.	N. Nabona, J. Gondzio, doctorando					×	×
OL.dif.1	UPC	N. Nabona, becario					×	
OL.dif.2	UPC	N. Nabona, becario					×	×

- ▷ **OL.grn.1:** datos disponibles
- ▷ **OL.grn.2:** report o publicación describiendo la comparación de ambas metodologías de resolver la coordinación a largo plazo
- ▷ **OL.hid.1:** código incompleto
- ▷ **OL.hid.2:** código completo
- ▷ **OL.hid.3:** código depurado de coordinación a largo plazo con hidráulica detallada y report o publicación describiendo resultados y su comparación con los obtenidos con modelo de hidráulica simplificada
- ▷ **OL.ipa.1:** estudio y diseño de nuevo código
- ▷ **OL.ipa.2:** código completo y depurado para problemas generales
- ▷ **OL.ipa.3:** código completo y depurado de punto interior para coordinación a largo plazo con hidráulica simplificada y report o publicación con comparación de actuación de código clásico y de código desarrollado de punto interior
- ▷ **OL.ipa.4:** código completo y depurado de punto interior para coordinación a largo plazo con hidráulica detallada y report o publicación con comparación de actuación de código clásico y de código desarrollado de punto interior
- ▷ **OL.dif.1:** adaptación de códigos, análisis de resultados y report o publicación sobre resolución de problemas reales de coordinación a largo plazo
- ▷ **OL.dif.2:** códigos disponibles en página web del grupo investigador para problemas de demostración.

Los medios necesarios para desarrollar estas tareas son:

- ★ medios de computación (servidores, terminales, software especializado)
- ★ bibliografía
- ★ viajes para intercambio de experiencias y presentación de resultados.

5 Beneficios del proyecto

5.1 Contribuciones científico-técnicas

5.1.1 Coordinación a largo plazo

A partir de los resultados ya obtenidos en coordinación a largo plazo dentro del proyecto (en curso) CICYT TAP1999-1075-c02-01 se plantean cuatro retos científico-técnicos:

- ★ La comparación entre las metodologías del conjunto activo y de generación de vértices (Dantzig-Wolfe) para resolver la coordinación a largo plazo con el modelo de Bloom y Gallant, a fin de determinar cual es más eficiente para este tipo de problemas.
- ★ La extensión de la optimización a variables hidráulicas (volúmenes y descargas) de la coordinación a largo plazo, limitada hasta ahora a energías generadas por unidades térmicas o por una (o varias) subunidades hidráulicas.
- ★ La aplicación de técnicas de punto interior para restricciones de desigualdad en entorno de conjunto activo ya está desarrollado. No ha sido aplicado en un problema en que existe un oráculo de determinación de restricciones a activar cuando se deshecha una restricción activa, y este es el caso particular de la metodología de conjunto activo para el método de Bloom y Gallant
- ★ La prueba de la muy alta dimensionalidad de las metodologías anteriores

La modelización planteada de largo plazo incluye el concepto de cuota de mercado (y su ajuste), y proporciona datos de energías de unidades térmicas e hidráulicas para el problema de corto plazo.

5.1.2 Coordinación a corto plazo

Las contribuciones al conocimiento científico-técnico del área de corto plazo se centran en los aspectos de desarrollo de *modelos de optimización* para la planificación de producción de energía eléctrica en entornos de mercado, y en los del avance en las *técnicas de optimización* de gran dimensión:

Modelos de optimización el modelo (**MACH-M**) que se propone desarrollar en este proyecto aportará tres novedades fundamentales. En primer lugar por heredar las características más destacables del modelo (**MACH**), desarrollado a lo largo de los proyectos CICYT TAP96-1044 y TAP1999-1075-C02, permitiendo incorporar una descripción detallada de todo el conjunto de unidades de generación térmica y hidráulica, así como la red de transmisión. Esta riqueza del modelo permite confeccionar una oferta de producción que tenga en cuenta, no solo sistema de generación de la propia compañía, sino también un modelo, agregado si se prefiere, tanto del sistema de los competidores como de la red de transmisión. En segundo lugar, se pretende avanzar en el conocimiento de los modelos de previsión del precio de mercado, el factor estocástico fundamental en el modelo (**MACH-M**). Aunque resulte sorprendente, en la bibliografía sobre este área no suele abundar en el detalle sobre el tratamiento de la estocasticidad de los precios de mercado. En tercer lugar, el modelo (**MACH-M**) incorpora métodos novedosos en la coordinación con las estrategias de gestión de recursos energéticos e hídricos marcados por la optimización a largo plazo. Una toma de decisión sobre la oferta a realizar al mercado diario que no tenga en consideración la estrategia a medio/largo plazo de la compañía provocará necesariamente una pérdida de beneficios a la empresa, así como una gestión poco eficiente de los recursos hídricos.

Técnicas de Optimización El problema de optimización asociado al modelo (**MACH-M**), planteado para una compañía de generación eléctrica, es un problema de optimización no lineal, mixto, de gran tamaño. La resolución eficiente de este problema no puede abordarse directamente mediante los códigos de optimización comerciales existentes en la actualidad, y debe ser abordada

mediante nuevas técnicas e implementaciones computacionales eficientes. El proyecto de investigación que se propone en esta memoria espera aportar nuevos métodos de optimización que permitan resolver el problema (30). En particular, se espera avanzar en el desarrollo de técnicas de optimización no diferenciable basadas en los métodos *Radar Subgradient* i *Radar Multiplier*, desarrollados en anteriores proyectos CICYT de este grupo, y poder comparar estos métodos con técnicas tipo *Cutting-Plane*, especialmente *Bundle Methods* y el método ACCPM.

5.1.3 Métodos de multiplicadores sobre redes

El problema de la planificación a corto plazo (con asignación de unidades fijada) se modeliza como un problema de flujos en redes con restricciones laterales no lineales. Los métodos de multiplicadores sobre redes permiten resolver el problema como una sucesión de problema de flujos en redes puros, para los cuales existen códigos muy eficientes. Se trata de extender la experiencia alcanzada dentro del proyecto (en curso) CICYT TAP1999-1075-c02-01 para introducir métodos subgradiente en la estimación de multiplicadores y el tratamiento de S.J. Wright de Jacobianos con rango deficiente, con lo cual se espera alcanzar una más rápida convergencia (evitando así resolver muchos subproblemas de flujos en redes).

También se pretende establecer una comparación con métodos alternativos para problemas de planificación hidrotérmica de muy alta dimensión.

Se trata además de incorporar estos códigos dentro de los de coordinación hidrotérmica a corto plazo (con asignación de unidades a optimizar) desarrollados en este mismo proyecto.

5.1.4 Métodos de optimización global

Los problemas planteados de coordinación a corto plazo son no convexos y, por consiguiente, pueden tener más de un mínimo. Por un procedimiento de minimización convencional, llegaremos a un mínimo local sin ninguna garantía de que éste sea el mínimo global.

Los métodos de optimización global aseguran la consecución del mínimo global pero, por el momento, su aplicabilidad es limitada a problemas de baja dimensión y no son muy eficientes. Dentro del proyecto (en curso) CICYT TAP1999-1075-c02-01 se ha logrado extender la minimización global para modelos en diferencia convexa a casos de hasta 30 variables. Ello ha llevado a encontrar el mínimo global de problemas pequeños de coordinación hidrotérmica a corto plazo, el cual ha coincidido siempre con el encontrado por métodos convencionales.

Ahora se pretende extender los procedimientos desarrollados hasta poder resolver este tipo de modelos hasta unas 60 variables. Con ello será posible resolver problemas pequeños de coordinación hidrotérmica a corto plazo con bombeo. Estos problemas son fuertemente no convexos y será interesante comprobar si logran obtener un mínimo global que queda fuera del alcance de los procedimientos convencionales.

5.2 Resultados esperables con posibilidad de transferencia de tecnología

El Sector Eléctrico en la vertiente de generación y transporte de electricidad (tanto nacional como internacional) es el receptor natural de los desarrollos que se deriven de este Proyecto.

Una vez desarrollados y probados los prototipos finales de modelo y algoritmo computacional de Coordinación Hidrotérmica a Largo y a Corto Plazo, podrían realizarse las adaptaciones a los casos de explotación de compañías eléctricas específicas. La viabilidad de los procedimientos descritos abriría perspectivas de futura aplicación de las tecnologías desarrolladas. Las principales ventajas para las entidades de generación y transporte de electricidad serían:

- La comprobación computacional de las novedades en modelización de la Coordinación Hidrotérmica a Largo y a Corto Plazo de grandes dimensiones
- Prueba de novedades algorítmicas en su aplicación al problema

- La consecución de un procedimiento de planificar la producción y de determinación de los precios de subasta diaria de las unidades de generación que se corresponde con el mantenimiento (o consecución) de una cuota de mercado determinada y con la maximización de la remuneración de la generación en la subasta.
- Dado que el algoritmo de corto plazo modeliza la reserva rodante incremental y decremental, y éstas tienen una remuneración específica en la subasta secundaria diaria, la optimización planteada puede tener en cuenta rigurosamente esta componente.
- El establecimiento de los límites de tamaño de los problema de Coordinación a Largo y a Corto Plazo que se puede resolver en un lapso de tiempo operativo razonable con los medios de cálculo disponibles actualmente.

Estas ventajas repercuten en una mejor utilización de los recursos hidráulicos (escasos) y térmicos (no ilimitados y caros) y en el control de las restricciones ambientales de emisión horaria y acumulada diaria y/o semanal ya vigentes en varios países y a imponer en el futuro como directiva de la U.E.. Ello conlleva la mayor competitividad de las compañías que empleen los procedimientos desarrollados y en el mayor ajuste posible del precio de la energía eléctrica.

Los resultados obtenidos son susceptibles de ser transferidos a los entes del Sector Eléctrico que puedan estar interesados, tal como se ha hecho ya por parte del Grupo Investigador en el pasado.

5.3 Adecuación del proyecto a las prioridades de la convocatoria

El proyecto presentado representa la continuación de los proyectos CICYT TAP96-1044 y TAP1999-1075-C02 del área de *TECNOLOGIAS AVANZADAS DE LA PRODUCCIÓN*, y, por ello, se ajusta de forma natural a las prioridades de la convocatoria del *PROGAMA NACIONAL DE DISEÑO Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL*, en particular a los siguientes objetivos mencionados en la convocatoria:

3. Potenciar el desarrollo de componentes y subsistemas.

3.3 Innovación en algoritmos de base de los sistemas de modelado, simulación y control en entornos de diseño y **producción**

3.16 Herramientas de simulación de procesos, servicios y sistemas. Simulación virtual distribuida. Sistemas de ayuda a la decisión.

3.18 Desarrollo de sistemas de planificación, programación y gestión de producción.

4. Innovar en medios y sistemas de fabricación y mejorar la organización y gestión de la producción.

4.9 Sistemas de planificación, programación y gestión de la producción, y su utilización desde todos los ámbitos de la empresa.

4.10 asignación de recursos, planificación y control automatizado de la producción.

6 Difusión y explotación en su caso de los resultados

Como habitualmente ha hecho el Grupo Investigador, los resultados alcanzados son descritos, presentados y publicados en los foros y revistas de las especialidades científico-técnicas que intervienen en el Proyecto.

Los resultados obtenidos son susceptibles de ser transferidos a los entes del Sector Eléctrico (compañías generadoras de electricidad) que puedan estar interesadas. (La actividad de nuestro grupo es conocida por todas las empresas del Sector en España.)

Las colaboraciones anteriores del grupo investigador con compañías españolas y extranjeras (a través de un proyecto europeo) prueban que los resultados obtenidos de nuestro trabajo son útiles

para estas empresas. Confiamos que los resultados de este proyecto tambien lo sean, ya que en algunos aspectos esperamos lograr resolver problemas ya anteriormente resueltos, pero ahora de forma aun más eficiente para casos de mayor dimensión.

A fin de facilitar el conocimiento de nuestro trabajo por parte de las empresas eléctricas tenemos montada una página web interactiva donde es posible ejecutar los códigos que hemos preparado con distintos casos de demostración y con posibilidad de alterar parte de los datos. Pondremos en conocimiento de las compañías generadoras la posibilidad de visitar esta página y comprobar la actuación de los códigos que producimos.

Nuestros planes de difusión de resultados también incluyen la demostración en un computador portátil de los códigos producidos de coordinación a largo y corto plazo, en la sede de las empresas eléctricas, al final del proyecto.

7 Historial del grupo solicitante

Composición y objetivos del grupo

El grupo surgió a partir de 1987 y ha contado desde entonces con un número variable de colaboradores. Sus actividades se han centrado en:

- ★ Estudio e implementación de las técnicas de optimización numérica, en especial las de flujos en redes y las de punto interior.
- ★ Nueva modelización de problemas de coordinación hidro-térmica de la generación de electricidad a corto y a largo plazo y aplicación de las técnicas desarrolladas a estos modelos.
- ★ Estudio de problemas de optimización asociados al tratamiento de problemas reales de coordinación hidro-térmica, como la gran dimensionalidad, la no convexidad de su función objetivo, la necesidad de resolución de problemas mixtos (con variables reales y binarias), etc.

El núcleo del grupo está formado por dos profesores del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la UPC

- Dr. D. Narcís Nabona, Catedrático de Universidad, que lo coordina desde su creación
- Dr. D. F. Javier Heredia, Profesor Titular de Universidad.

y un profesor del Departamento de Matemática Aplicada I de la UPC:

- D. Alberto Ferrer, Profesor Asociado a tiempo completo que está realizando la tesis bajo la dirección del Prof. N. Nabona en temas afines a los del presente Proyecto.

Con este grupo también colabora un profesor del Departamento de Matemática Aplicada, Estadística e Investigación Operativa de la Universidad del País Vasco:

- Dr. D. Eugenio Mijangos, Profesor Asociado a tiempo completo.

Forma también parte del grupo el antiguo alumno del programa de doctorado del Dept. de Estadística e Investigación Operativa de la UPC, cuya tesis fue dirigida por el Prof. F. Javier Heredia, en temas del Proyecto de Investigación

- Dr. D. César Beltran, actualmente efectuado trabajo postdoctoral en el centro Logilab de la Univ. de Ginebra (Suiza), para luego reintegrarse en el grupo investigador.

Para el Proyecto al que se refiere la presente solicitud el grupo contará con dos nuevos colaboradores:

- Prof. Jacek Gondzio, del Dept. of Mathematics and Statistics de la Univ. of Edinburgh (G.B.), (experto en optimización por métodos de punto interior), y
- Profra. Pilar Muñoz, del Dept. de Estadística e Investigación Operativa de la UPC, (experta en predicción y series temporales).

Otros investigadores que han formado parte del grupo son:

- Prof. J. Castro, del Dept. de Estadística e Investigación Operativa de la UPC, (actualmente responsable de otra propuesta de Proyecto).
- Prof. J.A. González, del Dept. de Estadística e Investigación Operativa de la UPC, (integrado actualmente en otra propuesta de Proyecto).
- D. Francesc Rossell, estudiante de doctorado y antiguo becario FPI.

Equipamiento del Grupo Investigador

- Adquirido con financiación propia para el uso exclusivo de los miembros del grupo: 1 workstation DEC alpha 2004/233, 1 workstation Sun Sparc 10/41 (un procesador), 1 workstation Sun UltraSparc 2 (2 procesadores), 3 Xterminal NCD, 4 PC's conectados en red que pueden ser usados como Xterminales de los servidores Sun.
- Adquirido con una ayuda de Acción Concertada solicitada por otro Grupo Investigador de nuestro Departamento conjuntamente con nuestro Grupo, 2 workstation Sun Sparc 2 más 1 workstation Sun IPC
- Acceso a los servicios de computación del Dept. de Estadística e Investigación Operativa (impresoras, red de PC, etc.) y a los de la UPC (correo electrónico, Internet, etc.)
- Acceso a los servicios de supercomputación del CEPBA (Centro Europeo de Paralelismo de Barcelona) de la UPC. y (mediante pago) a los servicios de supercomputación del CESCA (Centre de Supercomputació de Catalunya).

Se dispone además de bibliografía especializada y software adquirido o con licencia a renovar (*Ampl*, *Conopt*, *Cplex*, *Loqo*, *Minos*, *Snopt*), relativo a temas afines al Proyecto a desarrollar.

7.1 Financiación pública y privada (proyectos y contratos de I+D) 1997-2001 de los miembros del grupo investigador

Table 4: Financiación 1997-2001 por orden cronológico de inicio.

<i>título proyecto</i>	relación con solicitud	investigador principal	subvención concedida	Entidad financiadora y código	periodo de vigencia
			€		
Planificación óptima de gran dimensión de la producción hidrotérmica de energía eléctrica a corto plazo	1	N. Nabona	56976	CICYT Min. Educ. Ciencia TAP96-1044	C 07-1996/ 06-1999
SLOEGAT: Short and Long Term Optimization of Electricity Generation and Trading	1	N. Nabona (equipo UPC) J.L. de la Fuente (coordinador)	181988	Comisión de las Comun. Europeas ESPRIT 22695	C 12-1996/ 09-1999
Parallel solution of structured linear programs with interior point methods	2	J. Gondzio	83265	Engineering and Physical Sciences Research Council (G.B.) EPSCR	C 05-1999/ 10-2001
Planificación óptima de gran dimensión de la producción hidrotérmica de energía eléctrica	1	N. Nabona	77530	CICYT Min. Educ. Ciencia TAP1999-1075-c02-01	C 01-2000/ 12-2002
CASC: Computational Aspects of Statistical Confidentiality	2	J. Castro (equipo UPC) A. Hundepool (coordinador)	77739	Comisión de las Comun. Europeas IST-2000-25069	C 07-2000 06-2003

7.2 Historial reciente del grupo solicitante: indicadores 1997-2001

- 1) ¿El grupo de investigación solicitante es estable o se ha organizado para la presentación de este proyecto?

grupo estable (5 de 7 miembros) organizado para este proyecto (2 de 7 miembros)

- 2) Fecha de formación del grupo de investigación

3a) Publicaciones en revistas incluídas en bases de datos del ISI : [1, 14, 33, 34, 36, 40, 44, 48, 53, 54, 55, 57, 91, 105, 115, 118, 116, 92, 10, 12]

3b) en congresos internacionales con selección estricta de participación : [39, 41, 42, 43, 45, 46, 49, 50, 51, 78, 80, 79, 81, 82, 87, 88, 96, 98, 102, 107, 93, 117, 30, 13, 11, 5, 63, 64, 65, 66, 20]

3c) en revistas no incluídas en bases de datos del ISI : [84, 90, 10]

4) Numero de libros y capítulos de libros publicados : [28, 31, 32, 89, 59]

4b) Numero de monografías (= Research Reports) : [27, 35, 47, 52, 73, 77, 86, 97, 99, 100, 103, 104, 108, 106, 112, 113, 114, 9, 15, 58, 60, 61]

5a) Tesis doctorales dirigidas y presentadas por los miembros del equipo : [6, 56, 111]

5b) duración media del desarrollo y presentación de las tesis doctorales

6a) Numero de proyectos europeos

6b) Numero de proyectos internacionales (no europeos) en los que haya participado el grupo

8 Capacidad formativa del proyecto y del grupo solicitante

Cuatro de los integrantes del grupo imparten docencia universitaria de 2^o ciclo en temas del área de Estadística e Investigación Operativa y tres imparten también cursos de doctorado en Optimización por lo que, siendo un Proyecto de Investigación en Optimización, el Grupo dispone de buena capacidad formadora en esta área.

Se han leído tres tesis doctorales dirigidas por miembros del equipo investigador [7, 56, 111], sobre temas directamente relacionados con los del proyecto de I+D anterior (TAP99-1075-C02-01) y el de la actual solicitud. La tesis [7] fue dirigida por el Prof. F.J. Heredia, y las [56, 111] por el Prof. N. Nabona.

Durante el periodo 1997-2001 se han dirigido por parte de miembros del equipo investigador 3 Proyectos Fin de Carrera [25, 26, 74] sobre temas relacionados con este Proyecto.

References

- [1] A.F. Altmann and J. Gondzio. Regularized symmetric indefinite systems in interior point methods for linear and quadratic optimization. *Optimization Methods and Software*, 11–12:275–302, 1999.
- [2] R. Baldick. The generalized unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1):465–475, February 1995.
- [3] H. Balériaux, E. Jamouille, and F. Linard de Gertechin. Simulation de l’exploitation d’un parc de machines thermiques de production d’électricité couplé à des stations de pompage. *Revue E de la Soc. Royale Belge des Electriciens*, 7:225–245, 1967.
- [4] J. Batut and A. Renaud. Daily generation scheduling optimization with transmission constraints: A new class of algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3):982–987, August 1992.
- [5] C. Beltran. The radar subgradient method applied to the unit commitment problem. Estocolmo, 2000. 9 Stockholm Optimization Days.
- [6] C. Beltran. *Generalized unit commitment by the radar multiplier method*. PhD thesis, Statistics and Operations Research, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, 2001.
- [7] C. Beltran. *Generalized unit commitment by the radar multiplier method*. PhD thesis, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 2001.
- [8] C. Beltran and F. J. Heredia. A new dual variable update method: the radar subgradient. *Journal of Optimization Theory and Applications*.
- [9] C. Beltran and F. J. Heredia. A new dual method for the short-term hydrothermal coordination problem. Technical Report DR 98/09, Departament d’estadística i investigació operativa, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1998.
- [10] C. Beltran and F. J. Heredia. Short-term hydrothermal coordination by augmented Lagrangian relaxation: a new multiplier updating. *Investigación Operativa*, 8(1,2 and 3):63–76, July–December 1999.
- [11] C. Beltran and F. J. Heredia. Unit commitment by augmented lagrangian relaxation: testing two decomposition approaches. Cambridge, 1999. 19th IFIP-TC7 Conference on System Modelling and Optimization.
- [12] C. Beltran and F. J. Heredia. Unit commitment by augmented Lagrangian relaxation: testing two decomposition approaches. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 112(2), February 2002.
- [13] C. Beltran and F.J. Heredia. Short-term hydrothermal coordination by augmented lagrangian relaxation: a new multiplier updating. Buenos Aires, 1998. IX-CLAIO (Congreso Latinoiberoamericano de Informática e Investigación Operativa).
- [14] C. Beltran and F.J. Heredia. Short-term hydrothermal coordination by augmented lagrangean relaxation: a new multiplier updating. *Investigación Operativa. Publicación de la Asociación Latino-Ibero-Americana de Investigación Operativa.*, page Accepted for publication, 1998.
- [15] C. Beltran and F.J. Heredia. Unit commitment by augmented lagrangian relaxation: testing two decomposition approaches. Technical Report DR 2000/08, Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [16] D.P. Bertsekas. *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Academic Press, New York, NY, USA, 1982.

- [17] R. Bjorgan, Ch.-Ch. Liu, and J. Lawarrée. Financial risk management in competitive electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4):1285–1291, November 1999.
- [18] J.A. Bloom and L. Gallant. Modeling dispatch constraints in production cost simulations based on the equivalent load method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2):598–611, 1994.
- [19] J. Castro and N. Nabona. An implementation of linear and nonlinear multicommodity network flows. *European Journal of Operational Research*, 92:37–53, 1996.
- [20] J.C. Castro and F.J. Heredia. Using modeling languages for the complementary suppression problem through network flow models. Skopje (Republic of Macedonia), 2001. 2nd Joint UN-ECE/EUROSTAT Work Session on Statistical Data Confidentiality.
- [21] A. Chiva, N. Nabona, and F. J. Heredia. Network model of short-term optimal hydrothermal power flow with security constraints. In *Stockholm Power Tech. Proceedings*, volume PS, pages 67–73. IEEE, 1995.
- [22] A.J. Conejo and F.J. Prieto. Mathematical programming and electricity markets. *Top*, 2001.
- [23] A.R. Conn, N. Gould, and Ph.L. Toint. *LANCELOT: a Fortran package for large-scale nonlinear optimization*. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, New York, 1992.
- [24] G.B. Dantzig and P. Wolfe. Decomposition principle for linear programmes. *Operations Research*, 8:101–110, 1960.
- [25] M.A. Díez. Implementació de la metodologia de Bloom and Gallant de recobriment d'una monòtona de càrregues. Final year project, Facultat d'Informàtica de Barcelona, Univ. Politècnica de Catalunya, 08028 Barcelona, 1997.
- [26] M. Dinarès. Resolució de models quadràtics de planificació hidro-tèrmica a curt termini amb CPLEX. Final year project, Facultat de Matemàtiques i Estadística, Univ. Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona, 1997.
- [27] O. Epelly, J. Gondzio, and J.-P. Vial. An interior point solver for smooth convex optimization with an application to environmental-energy-economic models. Technical Report 2000-8, Logilab, Dept. of Management Studies, University of Geneva, Geneva, Switzerland, 2000.
- [28] A. Ferrer. Representation of a polynomial function as a difference of convex polynomials, with an application. *Lectures notes in Economics and Mathematical Systems*, 502:189–207, 2001.
- [29] R.W. Ferrero, J. F. Rivera, and S. M. Shahidehpour. Applications of games with incomplete information for pricing electricity in deregulated power pools. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(1), 1998.
- [30] X. Font, M.P. Muñoz, and M.M. Recober. Time series estimation through optimal filtering: Non-gaussian series. Madeira, 2001. 23rd European Meeting of Statistics.
- [31] E. Fragnière and J. Gondzio. Optimization modeling languages. In P. Pardalos and M. Resende, editors, *Handbook of Applied Optimization*, chapter 19, pages 993–1007. Oxford University Press, 2002.
- [32] E. Fragnière, J. Gondzio, and R. Sarkissian. Customized block structures in algebraic modeling languages: the stochastic programming case. In S. Holly, editor, *Proceedings of the CE-FES/IFAC98*. Elsevier Science, Amsterdam, 1998.
- [33] E. Fragnière, J. Gondzio, and R. Sarkissian. Efficient management of multiple sets to extract complex structures from mathematical programs. *Annals of Operations Research*, 104:67–87, 2001.

- [34] E. Fragnière, J. Gondzio, R. Sarkissian, and J.-P. Vial. Structure exploiting tool in algebraic modeling languages. *Annals of Operations Research*, 99:1145–1158, 2000.
- [35] E. Fragnière, J. Gondzio, and J.-P. Vial. A planning model with one million scenarios solved on an affordable parallel machine. Technical Report 98-11, Logilab, Dept. of Management Studies, University of Geneva, Geneva, Switzerland, 1998.
- [36] E. Fragnière, J. Gondzio, and J.-P. Vial. Building and solving large-scale stochastic programs on an affordable distributed computing system. *Management Science*, 46:167–187, 2000.
- [37] J. Garcia, J. Román, J. Barquín, and A. González. Strategic bidding in deregulated power systems. PSCC'99. Trondheim, Norway, 1999.
- [38] P.E. Gill, W. Murray, and M.A. Saunders. SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization. Technical Report NAR 97-2, Department of Mathematics, University of California, San Diego, La Jolla, CA, USA, 1997.
- [39] J. Gondzio. New features of HOPDM interior point code. INFORMS Conference, Dallas, USA, oct 1997.
- [40] J. Gondzio. Presolve analysis of linear programs prior to applying an interior point method. *INFORMS Journal of Computing*, 9:73–91, 1997.
- [41] J. Gondzio. The use of interior point methods with decomposition. INFORMS Conference, San Diego, USA, jul 1997.
- [42] J. Gondzio. Warm start of the primal-dual method applied in a cutting plane scheme. International Symposium on Mathematical Programming, aug 1997.
- [43] J. Gondzio. Reoptimization with the primal-dual interior point method. INFORMS Conference, Montreal, Canadá, apr 1998.
- [44] J. Gondzio. Warm start of the primal-dual method applied in the cutting plane scheme. *Mathematical Programming*, 83:125–143, 1998.
- [45] J. Gondzio. Solving stochastic programs with millions of scenarios by interior point based decomposition. OR41 Conference, Edinburgh, U.K., sep 1999.
- [46] J. Gondzio. Exploiting structure in the linear algebra of interior point methods. International Symposium on Mathematical Programming, Atlanta, USA, aug 2000.
- [47] J. Gondzio and A. Grothey. Re-optimization with the primal-dual interior point method. Technical Report TR MS-01-004, Dept. of Mathematics and Statistics, University of Edinburgh, Edinburgh, U.K., 2001.
- [48] J. Gondzio and R. Kouvenberg. High performance computing for asset liability management. *Operations Research*, 49:879–891, 2001.
- [49] J. Gondzio and R. Sarkissian. Exploiting structure in interior point lp optimizer. Applied Mathematical Programming and Modeling, APMOD'98, Limassol, Turkey, mar 1998.
- [50] J. Gondzio and R. Sarkissian. Interior point solver for structured linear programs. SIAM Conference of Optimization, Atlanta, USA, mar 1999.
- [51] J. Gondzio and R. Sarkissian. Interior point solver for structured linear programs. 19th IFIP TC7 Conference, Cambridge, U.K., jul 1999.

- [52] J. Gondzio and R. Sarkissian. Parallel interior point solver for structured linear programs. Technical Report TR MS-00-025, Dept. of Mathematics and Statistics, University of Edinburgh, Edinburgh, U.K., 2000.
- [53] J. Gondzio, R. Sarkissian, and J.-P. Vial. Using an interior point method for the master problem in a decomposition approach. *European Journal of Operational Research*, 101:577–587, 1997.
- [54] J. Gondzio, R. Sarkissian, and J.-P. Vial. Parallel implementation of a central decomposition method for solving large scale planning problems. *Computational Optimization and Applications*, 19:5–29, 2001.
- [55] J. Gondzio and J.-P. Vial. Warm start and e-subgradients in cutting plane scheme for block angular linear programs. *Computational Optimization and Applications*, 14:17–36, 1999.
- [56] J.A. González. *Aspectos estocásticos en la coordinación hidrotérmica a largo plazo*. PhD thesis, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1997.
- [57] J.A. González and N. Nabona. Multicommodity long-term hydrogeneration optimization with capacity and energy constraints. *TOP*, 8(1):73–96, 2000.
- [58] F. J. Heredia. Maph3 reference manual. Technical Report DR 97/11, Statistics and Operations Research Dept. Universitat Politècnica de Catalunya, 1997.
- [59] F. J. Heredia. Constrained nonlinear network flow problems through projected Lagrangian methods. In Nikos E. Mastorakis, editor, *Problems in Modern Applied Mathematics*, Mathematics and Computers in Science and Engineering, pages 406–411. World Scientific and Engineering Society Press, 2000.
- [60] F. J. Heredia. Maph5.2 reference manual. Technical Report DR 2000/09, Statistics and Operations Research Dept. Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [61] F. J. Heredia. Maph5.2 users guide. Technical Report DR 2000/10, Statistics and Operations Research Dept. Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [62] F. J. Heredia and N Nabona. optimum short-term hydrothermal scheduling with spinning reserve through network flows. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(3):1642–1651, august 1995.
- [63] F.J. Heredia. Nonlinear network flow problems with side constraints through projected lagrangian methods. Barcelona, 1997. EURO XV/INFORMS XXXIV Joint International Conference.
- [64] F.J. Heredia. Computational study of noxcb: an optimization code for the nonlinear network flow problem with linear side constraints. Cambridge, 1999. 19th IFIP-TC7 Conference on System Modeling and Optimization.
- [65] F.J. Heredia. Constrained nonlinear network flow problems through projected Lagrangian methods. Athens, 2000. 4th world conference on Circuits, Systems, Communications and Computer-sCSCC2000.
- [66] F.J. Heredia. Plannc: a projected lagrangian based implementation for constrained nonlinear network flow problems. Trier, 2001. 21th IFIP-TC7 Conference on System Modeling and Optimization.
- [67] J. Heredia and N. Nabona. Noxcb 6.2: Manual d’usuari. Technical report, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1991.
- [68] R. Horst, T.Q. Phong, and Ng.V. Thoai. On solving a d.c. programming problem by a sequence of linear programs. *Annals of Operation Research*, 25:1–18, 1990.

- [69] R. Horst and H. Tuy. *Global optimization. Deterministic approaches*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [70] IEEE PES Winter Meeting tutorial. *Game Theory Applications in Electric Power Markets*, volume 99TP-136, 1999.
- [71] N. Jiménez and A. Conejo. Short-term hydrothermal coordination by Lagrangian relaxation: Solution of the dual problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1):89–95, February 1999.
- [72] H. Konno, P.T. Thach, and H. Tuy. *Optimization on low rank nonconvex structures*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1997.
- [73] A. Lisser, A. Ouorou, J.-P. Vial, and J. Gondzio. Capacity planning in telecommunication networks. Technical Report 99-13, Logilab, Dept. of Management Studies, University of Geneva, Geneva, Switzerland, 1999.
- [74] X. Lorente. Despatxament òptim de generació d'electricitat en una xarxa de transport. Final year project, Facultat d'Informàtica de Barcelona, Univ. Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona, 1997.
- [75] M. Madrigal and V. H. Quintana. An interior-point/cutting-plane method to solve unit commitment problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(3):1022–1027, August 2000.
- [76] A. Merlin and P. Sandrin. A new method for unit commitment at Electricité de France. *IEEE Transactions on Power Systems*, PAS-102(5):1218–1225, May 1983.
- [77] E. Mijangos. PFNRN03 user's guide. Technical Report DR9705, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1997.
- [78] E. Mijangos. On superlinear multiplier update methods with partial augmented lagrangian techniques. Optimization 98, Universidade de Coimbra, Portugal, jul 1998.
- [79] E. Mijangos. An implementation of newton-like multiplier methods on nonlinear networks with nonlinear inequality side constraints. 19th IFIP TC7 Conference on System Modelling and Optimization, Cambridge, England, jul 1999.
- [80] E. Mijangos. Multiplier methods for nonlinear networks with side constraints. ICIAM 99 – International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Edinburgh, Scotland, jul 1999.
- [81] E. Mijangos. Superlinear-order multiplier estimation on nonlinear networks with nonlinear constraints. EURO XVII 17th European Conference on Operational Research, Budapest, Hungary, jul 2000.
- [82] E. Mijangos. Subgradient methods on nonlinear networks with nonlinear inequality side constraints, 2001.
- [83] E. Mijangos. An implementation of newton-like methods on nonlinearly constrained networks, 2002.
- [84] E. Mijangos. On superlinear multiplier update methods for partial augmented lagrangian techniques. *Qüestió*, 26, 2002.
- [85] E. Mijangos and N. Nabona. The application of the multipliers method in nonlinear network flows with side constraints. Technical Report DR9610, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1996.

- [86] E. Mijangos and N. Nabona. On the compatibility of the classical first order multiplier estimates with variable reduction techniques. Technical Report DR9706, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1997.
- [87] E. Mijangos and N. Nabona. On the compatibility of the classical first order multiplier estimates with variable reduction techniques when there are nonlinear inequality constraints. Euro XV – Informatics XXXIV Joint International Meeting, Barcelona, jul 1997.
- [88] E. Mijangos and N. Nabona. On the first-order estimation of multipliers from kuhn-tucker systems in multiplier methods using variable reduction. OR 98 – International Conference on Operations Research, ETH Zürich, Suiza, sep 1998.
- [89] E. Mijangos and N. Nabona. On the first-order estimation of multipliers from Kuhn-Tucker systems in multiplier methods using variable reduction. In P. Kall and H.-J. Lüthi, editors, *Operations Research Proceedings 1998*, pages 63–72. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [90] E. Mijangos and N. Nabona. On the compatibility of the classical first order multiplier estimates with variable reduction techniques when there are nonlinear inequality constraints. *Qüestió*, 23:61–83, 1999.
- [91] E. Mijangos and N. Nabona. On the first-order estimation of multipliers from Kuhn-Tucker systems. *Computers and Operations Research*, 28:243–270, 2001.
- [92] M.P. Muñoz, A. Dominguez, and L. Salleras. Estimated varicella incidence on the basis of a seroprevalence survey. *Epidemiol. Infect.*, pages 501–501, 2001.
- [93] M.P. Muñoz, A. Orcau, and H. Pañella. Estimation of the number of cases of meningococcal disease in barcelona by means of capture-recapture methodology. In *Proceedings in Compstat 1998.*, pages 193–194. IACR-Rothamsted for IASC, 2000.
- [94] B.A. Murtagh and M.A. Saunders. Minos 5.4 user’s guide. Technical Report SOL 83-20R (revised Feb 1995), System Optimization Laboratory, Stanford University, Stanford, CA, 1983.
- [95] N. Nabona. Multicommodity network flow model for long-term hydrogeneration optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2):395–404, 1993.
- [96] N. Nabona. Solutions to the short-term hydrothermal coordination of electricity generation by specialised QP IP algorithms. EURO XV – INFORMS XXXIV Joint International Meeting, Barcelona, jul 1997.
- [97] N. Nabona. Probabilistic long-term hydrothermal coordination using expected hydrogeneration contribution functions. Technical Report DR9801, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1998.
- [98] N. Nabona. Probabilistic long-term coordination of hydrothermal electric power generation using a multi-interval bloom and gallant model and expected hydrogeneration contribution functions. 19th IFIP TC7 Conference, Cambridge, U.K., jul 1999.
- [99] N. Nabona. Probabilistic long-term coordination of hydrothermal electric power generation using a multi-interval bloom and gallant model and expected hydrogeneration contribution functions. Technical Report DR9908, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1999.
- [100] N. Nabona. Solutions to the short-term hydrothermal coordination of electricity generation by specialised QP IP algorithms. Technical Report DR9902, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1999.

- [101] N. Nabona, J. Castro, and J.A. González. Optimum long-term hydrothermal coordination with fuel limits. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(2):1054–1062, 1995.
- [102] N. Nabona and M.A. Díez. Long-term thermal multi-interval thermal generation scheduling using Bloom and Gallant's linear model. EURO XV – INFORMS XXXIV Joint International Meeting, Barcelona, jul 1997.
- [103] N. Nabona and M.A. Díez. Long-term thermal multi-interval thermal generation scheduling using Bloom and Gallant's linear model. Technical Report DR9803, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1998.
- [104] N. Nabona and C. Gil. The MIBG code of multi-interval long-term thermal generation scheduling using Bloom and Gallant's model. Technical Report DR9901, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1999.
- [105] N. Nabona, C. Gil, and J. Albrecht. Long-term thermal power planning at VEW ENERGIE using a multi-interval Bloom and Gallant method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(1):69–77, 2001.
- [106] N. Nabona and A. Ramos. The “naive” path-following interior point method for linearly and nonlinearly constrained quadratic programming. Application to the short-term hydrothermal scheduling and the saw-path problems. Technical Report DR2000/19, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 2000.
- [107] N. Nabona and A. Ramos. Linearly and nonlinearly constrained optimization using the “naive” and Vanderbei and Shanno's interior-point algorithms. 20th IFIP TC7 Conference, Trier, Germany, jul 2001.
- [108] N. Nabona and F. Rossell. Formulation of the short-term hydrothermal scheduling of electricity generation and solutions through mixed integer programming. Technical Report DR9906, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1999.
- [109] J. Pérez-Ruiz and A.J. Conejo. Multi-period probabilistic production cost model including dispatch constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(2):502–507, 2000.
- [110] A. Ramos. *Convergència de mètodes de punt interior per a problemes no lineals. Aplicació a la coordinació hidrotèrmica a curt plaça de generació de electricitat*. PhD thesis, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 2001.
- [111] A. Ramos and N. Nabona. The application of Vanderbei and Shanno's interior-point algorithm for nonlinear programming to the short-term hydrothermal scheduling and the saw-path problems. Comparison with the “naive” method. Technical Report DR2000/21, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 2000.
- [112] F. Rossell. Algorisme primal-dual per a programació semidefinida. Technical Report DR 99/07, Dept. Estadística i Inv. Operativa, Univ. Politèc. de Catalunya, 08028 Barcelona, 1999.
- [113] F. Rossell and H. Wolkowicz. Semidefinite relaxations for mixed-integer programming. Technical report, Dept. of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo, Waterloo, Ont., Canada, 1998.
- [114] M. Saez, Tobias, M.P. A. Muñoz, and M.J. Campbell. Monitoring mortality as an indicator of influenzae in catalonia, spain. *Statis. Med.*, 18:2077–2086, 1999.
- [115] N. Saiz, C. Nos, J. Yagües, A. Dominguez, F. Graus, and M.P. Muñoz. The impact of the introduction of the 14-3-3 protein assay in the surveillance of sporadic creutzfeldt-jacob disease in catalonia. *J J Neurol*, 248:592–594, 2001.

- [116] Ll. Salleras, A. Dominguez, M.P. Muñoz, Martinez. A., and J.B. Cardenosa. Serogrup c meningococcal disease efectiveness of a mass vaccinations programme after 30 month follow up. In *Proceedings of the 19th Annual Meeting of the European Society for Paedriatic Infectious Diseases*, 2001.
- [117] M. Salleras, A. Dominguez, G. Prats, I. Parron, and M.P. Muñoz. Dramatic decline of serogroup c meningococcal disease incidence in catalonia (spain) 24 month after a mass vaccination programme of children and young people. *J. Epidemiol. Com. Health*, 55, 2001.
- [118] A.S. Strekalovsky and I. Tsevendorj. Testing the \mathcal{R} -strategy for a reverse convex problem. *Journal of Global Optimization*, 13:61–74, 1998.
- [119] S. K. Tong and S. M. Shahidehpour. An innovative approach to generation scheduling in large-scale hydro-thermal power systems with fuel constrained units. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(2):665–673, May 1990.
- [120] H. Tuy. Effect of the subdivision strategy on convergence and efficiency of some global optimization algorithms. *Journal of Global Optimization*, 1:23–36, 1991.
- [121] H. Tuy. *Convex analysis and global optimization*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998.
- [122] R.J. Vanderbei. LOQO: An interior point code for quadratic programming. Technical Report SOR-94-15, Dept. of Statistics and Operations Research, Princeton University, 1994.
- [123] R.J. Vanderbei and D.F. Shanno. An interior-point algorithm for nonconvex nonlinear programming. *Computational Optimization and Applications*, 13:231–252, 1999.
- [124] S.J. Wright. Modifying SQP for degenerate problems. Technical Report ANL/MCS-P699-1097, Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA, 2000.