

Nº REFERENCIA:



MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN

PROYECTOS I+D, ACCIONES ESTRATÉGICAS Y ERANETS

INFORME DE SEGUIMIENTO ANUAL

Investigador Principal: F. Javier Heredia Cervera
Título del Proyecto: Short- and Medium-Term Multimarket Optimal Electricity Generation Planning with Risk and Environmental Constraints.
Organismo: Universitat Politècnica de Catalunya
Centro: Facultat de Matemàtiques i Estadística
Departamento: Estadística i Investigació Operativa
Fecha de inicio del proyecto: 01/01/2009
Fecha de finalización del proyecto: 31/12/2011

Fecha: 12/02/2010

SR. SUBDIRECTOR GENERAL DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN
C/ Ramírez de Arellano,29, 28071 MADRID

A. ACTIVIDADES REALIZADAS Y GRADO DE CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

1. Describa brevemente las actividades realizadas en el pasado año de desarrollo del proyecto. Indique si existe algún resultado a que haya dado lugar el proyecto durante ese periodo.

En la memoria presentada al Ministerio se establecían cuatro objetivos genéricos para el presente proyecto, Modelización de mercados múltiples; Modelización de aspectos medioambientales; Modelización de la estocasticidad, Optimización y Análisis de las soluciones, cada uno de los cuales con sus correspondientes tareas organizadas a lo largo de los tres años de desarrollo del proyecto. A continuación se describe el estado y resultados obtenidos para aquellas tareas programadas para el primer año del proyecto.

Multimarket Modellization in the Short- and Medium-Term Planning

Las tareas MMO_DAT y MMO_SEC se han desarrollado en su práctica totalidad. A continuación se describen brevemente los trabajos realizados y la producción científica asociada:

- El estudio de los datos del Mercado eléctrico referidos a los contratos de futuro se inició ya en el tramo final del proyecto anterior (DPI2005-09117-C02-01) dando lugar al documento de investigación [R1] y la tesis final de carrera de [T1].
- Se han desarrollado modelos de optimización de la oferta de generación en el mercado que integran contratos bilaterales, centrales térmicas y de ciclo combinado, dando lugar al trabajo [R2], enviado a la revista *Annals of Operations Research* (en tercera revisión), a la presentación [C1] en el "2009 Power Engineering Society General Meeting", Calgary, y a la publicación en los proceedings del IEEE [P1].
- Se han desarrollado modelos que integran la oferta óptima al mercado diario con contratos bilaterales antes y después del mercado diario, tanto de las unidades térmicas como de la unidad de programación genérica, mediante la cual se pueden incorporar al mercado eléctrico la energía obtenida por las compañías de generación eléctricas en el Mercado de Emisiones Primarias de Energía, también conocidas como Virtual Power Plants (VPP). Este trabajo ha dado lugar al artículo [J1] aceptado para su publicación en el IEEE Transactions on Power Systems.
- Se ha avanzado en la justificación teórica del modelo de oferta optima en presencia de contratos de futuros, descrito en el trabajo [R4], en proceso de revisión en la revista *European Journal of Operations Research* (segunda revisión).
- Se ha desarrollado un modelo de oferta optima que integra contratos de futuros y contratos bilaterales, presentado en ponencia invitada en el *20th International Symposium of Mathematical Programming (ISMP)*, Chicago [C4].
- Se ha obtenido un primer modelo de integración de mercado diario y mercado de reserva, presentado como tesis final del Máster en Matemática Financiera de la UPC [T2].
- Se ha avanzado en la aplicación de los modelos de optimización conjunta de la oferta al mercado diario y contratos de futuros desarrollados para el MIBEL al mercado eléctrico Italiano, en colaboración con profesores de la Universidad de Bergamo ([P1], [C2], [C3]).

Respecto a la tarea MMO_MUL y MMO_OOF, consistentes en la inclusión en los modelos del mercado intradiario, que debería finalizar en marzo de 2010, nos encontramos en su pleno desarrollo. Este trabajo ha sido aceptado para su presentación en el *European Energy Markets Conference 2010 (EEM'10)* que se celebrará en junio en Madrid, y se está trabajando en estos momentos en la elaboración del artículo que será sometido a la publicación como proceedings del IEEE. Debe tenerse en cuenta que para esta tarea se contaba en la planificación original con la ayuda de un investigador contratado que fue descartado en la financiación del proyecto, por lo que es de esperar que dicha tarea sufra retrasos respecto a la programación original y que, posiblemente, no pueda ser completada en alguna de sus partes.

Respecto de la tarea MMO_NET, consistente en el estudio de la inclusión de un modelo FPOR en los problemas de optimización de mercado, durante el 1er año del proyecto

fueron propuestos modelos matemáticos y técnicas de solución para resolver el problema de flujo de potencia óptimo reactivo (FPOR), considerando: a) una nueva formulación para resolver el problema de FPOR utilizando las ecuaciones de inyección de corriente, con características dispersas que disminuyen el esfuerzo computacional, especialmente cuando es usado un método de puntos interiores; b) una comparación entre cinco diferentes programas de optimización de programación no lineal para resolver el problema de FPOR utilizando ecuaciones de potencia, evaluando el tiempo computacional total, tiempo computacional de evaluación de las funciones, número de iteraciones y casos de no convergencia; c) una comparación del esfuerzo computacional entre la formulación de FPOR utilizando ecuaciones de inyección de corriente y la formulación del FPOR utilizando ecuaciones de potencia; y d) un algoritmo de método de puntos interiores con técnicas de región de confianza para resolver la formulación del FPOR utilizando ecuaciones de potencia, mostrando ser un algoritmo rápido y capaz de asegurar una convergencia global del problema. Este trabajo, que se basa en la investigación fue iniciada en 2008 [R5] y continuada en 2009 por el investigador Marcos Rider. No obstante, a la vista de los resultados, no se ha considerado adecuado, al menos de momento, la inclusión de estos modelos FPOR en los problemas de mercado eléctrico.

En el área de la planificación de la generación a medio plazo se ha trabajado en dos de los módulos de que consta el Proyecto: Multimarket Modelling in the Short- and Medium-Term Planning, y Modelization of environmental issues. En razón de la financiación otorgada, que permite sólo una parte de la contratación propuesta, se ha reorganizado la distribución temporal de algunas tareas, pasando del segundo al primer año parte de las tareas ENV_REN, ENV_INF i ENV_MOD.

En la modelización multimercado de medio plazo se ha trabajado en las tareas MMO_DAT, MMO_BCT y MMO_DEM. A partir de datos del Pool ibérico se han desarrollado modelos de futuros que han servido para mitigar el riesgo en la optimización por programación estocástica usando escenarios de la planificación de la generación a medio plazo en un mercado liberalizado de pool puro. Fruto de ello es el artículo aparecido en la revista IEEE Transactions on Power Systems [J2] a principios de 2009 que describe las bases del modelo de mercado a medio plazo y la tesis doctoral del Dr. M. Tesser, leída en diciembre de 2009 [TD1].

Esta tesis contiene también un capítulo sobre como tener en cuenta la elasticidad de la demanda a medio plazo (tarea MMO_DEM) donde se describe como modelizar la variación de la demanda de una monótona de cargas según el nivel de precio de mercado a través de una variante de la formulación de Bloom y Gallant del recubrimiento de la carga a medio plazo. Se ha estado desarrollando un artículo sobre este tema, pendiente de terminación

El modelo de mercado mixto, con contratos bilaterales, ha sido desarrollado en paralelo. Este modelo conduce a una función objetivo no convexa de beneficios de explotación para comportamiento tipo cartel de las compañías generadoras. (Está en desarrollo la formulación con comportamiento en equilibrio utilizando el algoritmo NIRA de optimizaciones sucesivas) Se ha estado escribiendo un artículo sobre este tema, pendiente de terminación.

Modelization of the stochasticity

Respecto el punto STO_PMP, se ha buscado un método que facilitara la construcción de un modelo para los precios del mercado. En particular se pretendía hacer más sencilla la fase de estimación del modelo y la actualización del mismo cuando se incluyeran nuevos datos, esto sin perder calidad en las previsiones. Para ello se ha usado las técnicas de Times Series Factor Analysis, estas técnicas han sido ampliamente usadas en entornos económicos pero, hasta donde sabemos, nunca se habían usado para los precios del mercado de la energía. El resultado ha sido muy satisfactorio ya que el error de previsión se ha mantenido respecto los métodos ARIMA usados anteriormente y se ha conseguido un mecanismo para la estimación de precios de mercado más ágil y fácil. Los resultados de esta implementación se describen en el trabajo [R4] y fueron presentados en agosto de 2009 en el congreso del *International Statistical Institute* en Durban, Sud África [C5].

Para la modelización de la generación eólica en medio plazo (tarea STO_MTM) y a partir de los datos de generación eólica 2002-08, se ha desarrollado un modelo consistente en asimilar la generación eólica a dos pseudo-unidades: una cuya capacidad y cuya probabilidad de fallo (alta) son distintas en cada subperiodo de tiempo, y otra con probabilidad de fallo reducida (10%) pero con capacidad distinta según el nudo en un árbol de escenarios estocástico. Se ha descrito en la tesis de fin de Master [T3] de Dña. Laura Marí (actualmente becaria FPI asociada a este Proyecto).

Se ha desarrollado un árbol de escenarios con distintos niveles de generación hidráulica y de eólica por un procedimiento mixto de generación directa y por el método de Montecarlo, de forma que no exceda los 30.000 nudos. Luego este árbol se reduce para que tenga un número determinado de escenarios (p.e. 70) usando el procedimiento hacia atrás de Heitsch y Römisch.

Journal articles

- [J1] F. J. Heredia, M. J. Rider, C. Corchero, "Optimal Bidding Strategies for Thermal and Generic Programming Units in the Day-ahead Electricity Market", *IEEE Transactions on Power Systems*, accepted. Previously appeared as [Research Report DR 2008/13](#), Dept. of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya
- [J2] M. Tesser, A. Pagès and N. Nabona 2009. "An oligopoly model for medium term power planning in a liberalized electricity market". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, No. 1, pp 67-77

Research Reports

- [R1] G. Casanellas, C. Corchero, F. J. Heredia, [Generació de la corba d'oferta a partir de les dades públiques del MIBEL](#), Barcelona, Dept. of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya, pp. 27, 11/2008.
- [R2] F. J. Heredia, M. J. Rider, C. Corchero, "[A stochastic programming model for the optimal electricity market bid problem with bilateral contracts for thermal and combined cycle units](#)", *Submitted to Annals of Operations Research*, Barcelona, Group on Numerical Optimization and Modelling, E-Prints UPC, <http://hdl.handle.net/2117/2282>. UPC., Universitat Politècnica de Catalunya
- [R3] C. Corchero, F. J. Heredia, "[A Stochastic Programming Model for the Thermal Optimal Day-Ahead Bid Problem with Physical Futures Contracts](#)", *Submitted to European Journal of Operations Research*, Barcelona, Espanya, research Report DR 2009/03, Dept. of Statistics and Operations Research, E-Prints UPC <http://hdl.handle.net/2117/2795>, Universitat Politècnica de Catalunya Universitat Politècnica de Catalunya, pp. 19, 03/2009.
- [R4] M. P. Muñoz, C. Corchero, F. J. Heredia, [Improving electricity market price scenarios by means of forecasting factor models](#), Barcelona, Spain, Dept. of Statistics and Operations Research, Technical University of Catalonia, pp. 12, 09/2009.
- [R5] M. Lavorato, A. V. Garcia e F. J. Heredia, "[Método de Pontos Interiores com Técnicas de Região de Garantia para Resolver o Problema de Fluxo de Potência Ótimo Reativo](#)" (en portugués), relatório técnico para el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Doctorado Sandwich en el Exterior, pp. 66. 2008

Conference proceedings

- [P1] F. J. Heredia, M. J. Rider, C. Corchero, "[Optimal Bidding Strategies for Thermal and Combined Cycle Units in the Day-ahead Electricity Market with Bilateral Contracts](#)", *Proceedings of the 2009 Power Engineering Society General Meeting*, Calgary, Alberta, Canada. Vol. 1, pags.: 1-6, ISSN: 1944-9925, ISBN: 978-1-4244-4241-6. 2009.
- [P2] M.T. Vespucci, C. Corchero, M. Innorta, F.J. Heredia, "A decision support procedure for the short-term scheduling problem of a generation company operating on day-ahead and

physical derivatives electricity markets", 11th International Conference on the Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises, Bergamo, Italy, 15-16/10/2009, ISBN 978-88-89555-09-05

Conference presentations

- [C1] F. J. Heredia, M. J. Rider, C. Corchero, "[Optimal Bidding Strategies for Thermal and Combined Cycle Units in the Day-ahead Electricity Market with Bilateral Contracts](#)", 2009 *Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, Calgary, Alberta, Canada, IEEE, pp. 1-6, 26-30/07/2009
- [C2] C. Corchero, M.T. Vespucci, F. J. Heredia, M. Innorta, "[A stochastic approach to the decision support procedure for a Generation Company operating on Day-Ahead and Physical Derivatives Electricity Market](#)", *EURO XXIII: 23rd European Conference on Operational Research*, Bonn, Germany, 05-08/07/2009.
- [C3] M.T. Vespucci, C. Corchero, F. J. Heredia, M. Innorta, "[A Short-term Scheduling Model for a Generation Company operating on Day-Ahead and Physical Derivatives Electricity Markets](#)", *Third FIMA International Conference*, Gressoney Saint Jean, Italy., 19-22/01/2009.
- [C4] F. J. Heredia, C. Corchero, "[Stochastic programming models for optimal bid strategies in the Iberian Electricity Market](#)", *The 20th International Symposium of Mathematical Programming (ISMP)*, Chicago, 23-28/08/2009.
- [C5] M. P. Muñoz, C. Corchero, F.J. Heredia, "[Improving electricity market price scenarios by means of forecasting factor models](#)", *The 57th Session of the International Statistical Institute*, Durban, South Africa, International Statistical Institute, 16-22/08/2009.

Tesis Doctorales

- [TD1] M. Tesser PhD thesis: "Risk and forward contracting in medium-term electricity generation planning", Dept Estadística i Investigació Operativa, UPC, diciembre 2009. (con mención europea).

Tesis Finales de Grado y Master

- [T1] Silvia Nieto, Iván Ruz, [Estudi i optimització de l'oferta al Mercat Ibèric d'Electricitat \(MIBEL\)](#), F. Javier Heredia, Diploma in Statistics, Faculty of Mathematics and Statistics, UPC, 09/07/2009.
- [T2] Eva Romero i Beneyto, [Oferta òptima multi-mercat al Mercat Ibèric d'Electricitat](#), Director, F. Javier Heredia. Master Tesis Final de Màster, Master of Mathematical Engineering, , Facultat de Matemàtiques i Estadística, UPC.
- [T3] Laura Marí MsC thesis: "Planificació òptima estocàstica a mig termini de la producció d'electricitat en un mercat oligopolístic", Febrero de 2009.

2. Si ha encontrado problemas en el desarrollo del proyecto, coméntelos, especificando su naturaleza (de carácter científico, de gestión, etc).

La función de precio de mercado utilizada para determinar el beneficio de las compañías generadoras a maximizar es endógena (depende del nivel global de producción hidráulica) y puede ser no convexa para valores realistas de los parámetros. En la solución de equilibrio encontrada a través del algoritmo NIRA se observan para algunos casos de prueba los efectos adversos de la no convexidad al obtener resultados distintos para un mismo problema utilizando algoritmos de resolución distintos. Esto no habíamos encontrado que sucediera en soluciones de planificaciones con la hipótesis de comportamiento de tipo cartel. Esto implicará trabajo adicional en mejora de métodos de solución para acercarnos al óptimo global en vez de quedarnos con una solución local.

B. PERSONAL ACTIVO EN EL PROYECTO DURANTE EL PERÍODO QUE SE JUSTIFICA.

En el cuadro siguiente debe recogerse la situación de todo el personal del o de los Organismos participantes que haya prestado servicio en el proyecto en la anualidad que se justifica, o que no haya sido declarado anteriormente, y cuyos costes (salariales, dietas, desplazamientos, etc.), se imputen al mismo.

Si la persona estaba incluida en la solicitud original, marque “S” en la casilla correspondiente y no rellene el resto de casillas a la derecha.

Indique en la casilla “Categoría Profesional” el puesto de trabajo ocupado, el tipo de contratación: indefinida, temporal, becarios (con indicación del tipo de beca: FPI, FPU, etc.), etc.

En el campo “Función en el proyecto” indique el tipo de función/actividad realizada en el proyecto, (p.ej., investigador, técnico de apoyo,...).

Recuerde que:

- En este capítulo sólo debe incluir al personal vinculado a los Organismos participantes en el proyecto. Los gastos de personal externo (colaboradores científicos, autónomos...) que haya realizado tareas para el proyecto debe ser incluido en el capítulo de “Varios”.

- Las “Altas” y “Bajas” deben tramitarse de acuerdo con las “Instrucciones para el desarrollo de los proyectos de I+D” expuestas en la página web del MEC.

Apellido 1	Apellido 2	Nombre	NIF/NIE	Catgª Profesional	Incluido en solicitud original	Si no incluido en solicitud original:		
						Función en el proyecto	Fecha de Alta	Observaciones
Heredia	Cervera	F. Javier	46533591Z	Titular de Universidad	S			
Corchero	Garcia	Cristina	46766118B	Becaria FPI	S			
Mijangos	Fernández	Eugenio	14238189Q	Titular de Universidad	S			
Rider	Flores	Marcos J.	1758452	Investigador contratado	S			

C. PROYECTOS COORDINADOS (*Cumplimentar sólo por el coordinador si se trata de un proyecto coordinado*)

Describe el desarrollo de la coordinación entre subproyectos en este año, y los resultados de dicha coordinación con relación a los objetivos globales del proyecto.

El presente no es un proyecto coordinado.

D. RELACIONES O COLABORACIONES CON DIVERSOS SECTORES

1. En caso de que estuviera prevista la participación o respaldo activo por parte de alguna Empresa o Agente socio-económico con interés en el proyecto, indique cómo se está realizando dicha participación.

El proyecto cuenta con la participación como EPOs de la empresas eléctricas Unión Fenosa y Gas Natural, en concreto, con los departamentos de mercado eléctrico de ambas compañías, responsables de la elaboración de las ofertas al mercado diario. Durante el año 2009, estas empresas nos han facilitado datos e información que se ha tenido en cuenta en la elaboración de los modelos de optimización de mercado diario. Por una parte, Gas Natural suministró ya en el 2008 información sobre las características de sus unidades de programación en el mercado diario, especialmente sobre el funcionamiento de las unidades de ciclo combinado. Esta información se tuvo en cuenta en los trabajos [C1], [P1] y [R2] citados anteriormente. Por su parte Los contactos mantenidos con Unión FENOSA durante el año 2009 se centraron en cuestiones relacionadas con las ofertas a los mercados de reserva e intradiarios y fueron y están siendo de utilidad en la realización del trabajo [T2] y en el desarrollo de las tareas relacionadas con los modelos (MMO_SEC, MMO_MUL y MMO_OOF). Cabe mencionar que precisamente durante el año 2009 se produjo la fusión de las dos empresas EPO de este proyecto, y la consiguiente reestructuración de sus departamentos de mercado diario, lo que lógicamente dificultó en cierta medida la comunicación con estas empresas.

2. Si el proyecto ha dado lugar a otras colaboraciones o transferencias con entidades no académicas, descríbalas brevemente.

No se ha dado el caso

3. Si el proyecto ha dado lugar a colaboraciones con otros grupos de investigación, coméntelas brevemente.

Se ha avanzado en la aplicación de los modelos de optimización conjunta de la oferta al mercado diario y contratos de futuros desarrollados para el MIBEL al mercado eléctrico Italiano, en colaboración con profesores de la Universidad de Bergamo ([C2], [C3]). Este trabajo es la continuación de la colaboración con los profesores Ma. Teresa Vespucci y Mario Innorta de la Universidad de Bergamo, Italia, iniciada a raíz de la estancia de la Sr. Cristina Corchero en la universidad de Bergamo durante el año 2008.

4. Si ha iniciado la participación en proyectos del Programa Marco de I+D de la UE y/o en otros programas internacionales en temáticas relacionadas con la de este proyecto, indique programa, tipo de participación y beneficios para el proyecto.

No se ha dado el caso.

E. GASTOS REALIZADOS

Nota: Debe cumplimentarse este apartado independientemente de la justificación económica enviada por el organismo.

1. Indique el total de gasto realizado en el proyecto hasta este momento:

	Total gasto de la anualidad (€)
Personal	0.00€
Otros costes de ejecución	6.294,90
TOTAL GASTO REALIZADO	6.294,90

2. Comente brevemente si ha habido algún tipo de incidencia en este apartado.

Los gastos correspondientes a esta primera anualidad se han limitado casi exclusivamente a los derivados de las presentaciones a congresos (viajes, inscripciones, dietas) y a la elaboración de artículos científicos. No se ha realizado ningún gasto significativo en las partidas más importantes del proyecto, que son equipamiento informático y personal de soporte a la investigación. En el caso de los gastos para las partidas de equipamiento informático, el equipo de investigación contaba del Proyecto anterior con equipamiento suficiente como para trabajar cómodamente durante el primer año, por lo que las inversiones importantes (servidores de cálculo intenso, PCs personales, actualizaciones de licencias, etc) están previstas a partir del segundo año. De igual forma, a pesar del recorte presupuestario respecto de la solicitud original, se tiene prevista la contratación, durante el año 2010, de un investigador Post-Doc, por un periodo aproximado de entre un año y año y medio.

F. GASTOS DE EJECUCIÓN: MODIFICACIONES DE CONCEPTOS DE GASTO CON RESPECTO A LA SOLICITUD ORIGINAL.

Recuerde que los trasvases entre gastos de personal y gastos de ejecución deben tramitarse de acuerdo con las “Instrucciones para el desarrollo de los proyectos de I+D” expuestas en la página web del MEC.

a) Equipamiento:

En el cuadro adjunto, rellene una línea por **cada equipo adquirido no previsto en la solicitud inicial** que dio lugar a la concesión de la ayuda para el proyecto y justifique brevemente su adquisición. Si se ha adquirido un equipo en sustitución de otro que figuraba en la solicitud de ayuda inicial (por mejorar sus prestaciones, por obsolescencia del anterior...), indicarlo también en la casilla correspondiente.

Identificación del equipo	Importe	Justificación adquisición	Sustituye a ...(en su caso).

b) Viajes/Dietas:

En el cuadro adjunto se justificará la imputación de gasto en viajes y dietas sólo en el caso de que este **tipo de gasto no estuviera previsto en la solicitud inicial.**

--

c) Material fungible:

Se describirá y razonará en el siguiente cuadro la adquisición del material fungible incluido en la justificación, sólo cuando **este tipo de gasto no estuviera previsto en la solicitud original**.

--

d) Varios:

Se describirán en el siguiente cuadro los gastos varios más relevantes incluidos en la justificación y **no previstos en la solicitud original**, justificando brevemente su inclusión. En este apartado se incluirá, entre otros, al personal externo y, en el caso de que el gasto justificado se refiera a colaboraciones científicas, se identificará al colaborador.

--