

AVISO IMPORTANTE - La memoria no podrá exceder de 20 páginas. Para rellenar correctamente esta memoria, lea detenidamente las instrucciones disponibles en la web de la convocatoria. Es obligatorio rellenarla en inglés si se solicita más de 100.000,00 €.

IMPORTANT - The research proposal cannot exceed 20 pages. Instructions to fill this document are available in the website. If the project cost exceeds 100.000,00 €, this document must be filled in English.

IP 1 (Nombre y apellidos): Jordi Castro Pérez

IP 2 (Nombre y apellidos): F. Javier Heredia Cervera

TÍTULO DEL PROYECTO (ACRÓNIMO)

Modelización y Optimización de Problemas Estructurados de Gran Escala y Aplicaciones (MOLSA)

TITLE OF THE PROJECT (ACRONYM):

Modelling and Optimization of Large-Scale Structured Problems and Applications (MOLSA)

1. PROPUESTA CIENTÍFICA - SCIENTIFIC PROPOSAL

1. Antecedentes y estado actual

1. Los antecedentes y estado actual de los conocimientos científico-técnicos de la materia específica del proyecto, incluyendo, en su caso, los resultados previos del equipo de investigación y la relación, si la hubiera, entre el grupo solicitante y otros grupos de investigación nacionales y extranjeros.

Si el proyecto es continuación de otro previamente financiado, deben indicarse con claridad los objetivos y los resultados ya alcanzados de manera que sea posible evaluar el avance real que se propone en el nuevo proyecto. Si el proyecto aborda un tema nuevo, deben indicarse los antecedentes y contribuciones previas del equipo de investigación que justifiquen su capacidad para llevarlo a cabo.

El tamaño de los problemas de optimización (lineales, no lineales, y enteros) que deben solucionarse en la actualidad ha crecido órdenes de magnitud en los últimos 30 años, hasta el punto que problemas impensables hace unos años ya están siendo abordados en campos tan diversos como la logística, planificación de la producción y cadena de suministro, generación de energía eléctrica, y especialmente, en ciencia de datos ("*data science*"). Sin embargo, los problemas de cientos o miles de millones de variables son difícilmente abordables con los métodos y paquetes de optimización de propósito general (como CPLEX de IBM, Gurobi, XPRESS de FICO, etc). Por ejemplo, en una reciente visita que realizamos a las oficinas de Google en New York (invitados a dar una charla sobre los métodos de optimización desarrollados por nuestro grupo), se nos indicó que miembros del grupo de Algorithms, Theory and Optimization están desarrollando alternativas al algoritmo del *símplex* para la solución de problemas lineales (del campo de *data science*) de altísima dimensión. El objetivo último de este proyecto es por tanto desarrollar métodos de optimización para problemas de gran dimensión, que aprovechen la estructura del problema, tanto deterministas como estocásticos, y su aplicación a casos reales de diversos campos: logística, cadena de suministro, optimización estocástica, protección de datos, ciencia de datos, y generación de energía eléctrica.

La solución de algunos de los problemas estructurados y masivos anteriores puede abordarse mediante el **método de punto interior** [Wri97] inicialmente sugerido en [Cas00]. Este método fue considerado en [Bix02] el método de punto interior más eficiente para problemas de flujos multiartículo. (Este trabajo, firmado por Robert Bixby, fundador de CPLEX, apareció en un número especial de *Operations Research* para conmemorar el 50

aniversario de esta revista, y repasaba la evolución de la programación lineal computacional en la última década; El único trabajo citado en [Bix02] de un investigador del estado español fue precisamente [Cas00]). En los últimos años se ha generalizado este método en diversos proyectos (p.e., MTM2006-05550, MTM2009-08747, MTM2012-31440, y actualmente en MTM2015-65362-R) a problemas de optimización convexos separables con estructura diagonal por bloques y restricciones de acoplamiento (problemas denominados angulares por bloques). Esto se ha realizado en una serie de trabajos, destacando, por ejemplo, [BocCasOli13, Cas03a, Cas03b, Cas07b, CasCue10, CasCue11, CasCue12, Cas16, CasNas17, CasNasSal17]. Dicho método se basa en la resolución de las ecuaciones normales que aparecen a cada iteración del método de punto interior mediante una combinación de métodos directos (factorización de Cholesky) con métodos iterativos (gradiente conjugado preconditionado), usando un preconditionador específico (denominado preconditionador por series de potencias) para problemas angulares por bloques, y regularizaciones en la función objetivo. Al final del proyecto MTM2012-31440, se presentó una implementación eficiente inicial de dicho método, denominada BlockIP (<http://www-eio.upc.edu/~jcastro/BlockIP.html>), que ha sido mejorada durante el proyecto MTM2015-65362-R. En la actualidad BlockIP tiene unas 17000 líneas de código numérico escritos en el lenguaje de programación C++. La mejora de este algoritmo y paquete de optimización (p.e., adición de restricciones cuadráticas, mejora de preconditionadores, paralelización del algoritmo) está entre los objetivos metodológicos del proyecto.

Por lo que se refiere al marco general de la Programación Estocástica Multietapa (PEM) este proyecto se propone hacer aportaciones en la modelización y resolución eficiente de problemas de PEM estructurados y su aplicación a problemas de integración de energías renovables y diseño estratégico de la cadena de suministro. Estas contribuciones se apoyan en los resultados obtenidos en diversos proyectos de investigación, los más recientes: Short- and Medium-Term Multimarket Optimal Electricity Generation Planning with Risk and Environmental Constraints (DPI2008-02153, <https://gnom.upc.edu/en/projects/energy/dpi2008-02153>); Forecasting and optimization of wind generation in energy markets (MTM2013-48462-C2-1-R. <https://fowgem.upc.edu/>) y Strategic Models in Supply Chain Design through Stochastic Programming (Accenture TechLabs, <https://gnom.upc.edu/en/projects/manufacturing/smscd-2017>).

Los problemas de Programación Estocástica Multietapa (PEM) consideran el proceso estocástico multivariante $\xi := (\xi_1, \dots, \xi_T)$, $\xi_t \in \mathbb{R}^d$ aproximado mediante el árbol de escenarios $\tilde{\xi} = (\tilde{\xi}_1, \dots, \tilde{\xi}_T)$. Diversos grupos han abordado el problema de la construcción de árboles de escenario (ver [KauWal03] y [DupConWal00] para una revisión de los métodos). De entre todos los procedimientos propuestos destacamos (a) backward/forward tree construction algorithms, [HeiRom09], (b) unconstrained stochastic approximation algorithm, [Pfl01] y (c) Sample Average Approximation, [Sha06]. En nuestro grupo se ha adaptado el algoritmo forward tree construction, [HeiRom09] y los resultados se aplicaron a un modelo PEM de oferta óptima de la generación eólica, [HerCua17]. El árbol de escenarios $\tilde{\xi}$ se generará a partir de modelos de previsión de las variables aleatorias representadas el proceso estocástico ξ . Con este fin hemos desarrollado métodos de estimación basados en algoritmos clásicos y robustos de la estadística, utilizando el algoritmo EM para mistura de modelos, [MuñSan12]. En [SanMuñMar13] se aborda la predicción de la dirección del viento como variable determinante de la velocidad del mismo. Nuestro grupo también ha propuesto en [MuñCorHer13] utilizar la metodología Time Series Factor Analysis, [GilMei05] a la predicción de precios de mercado eléctrico, y ha demostrado que este enfoque proporciona previsiones equivalentes a los obtenidos también en nuestro grupo de un modelo ARIMA, [Cor11], pero con una mayor simplicidad.

Los modelos PEM implicados en las aplicaciones de mercados eléctricos y cadena de suministro propuestos en este proyecto son problemas estructurados de optimización lineal y no lineal mixta (MINLP) de gran tamaño, difíciles de resolver por métodos directos con el software comercial disponible (habitualmente CPLEX). Hemos aproximado la función objetivo cuadrática por medio de cortes de perspectiva ([FraGen06a]) obteniéndose una reducción promedio de un orden de magnitud en los tiempos de ejecución respecto de optimizadores comerciales ([CorHerMij11] y [CorHerMij13]). Por otro lado hemos desarrollado algoritmos Ramificación y Fijación Coordinada (BFC) ([AloEscOrt03] y

[EscGarMer12]) aplicados a la resolución de programas estocásticos cuadráticos mixtos 0-1 bi-etapa de mercado eléctrico habiéndose publicado los resultados en [CorHerMij13, Mij13]. Hemos abordado la resolución de problemas de programación estocástica mixta con función objetivo convexa y restricciones convexas bi-etapa, [Mij15], y multietapa, [Mij16], demostrándose su eficiencia respecto a códigos comerciales de propósito general. [AldEscMer13, AldEscMer17] y [PagPerTom15] han comprobado la eficiencia de la paralelización del algoritmo BFC en problemas lineales de gran tamaño de PEM mixta 0-1. Por otro lado, los métodos de descomposición dual han sido tradicionalmente usados en la resolución de problemas de asignación de unidades mediante relajaciones lagrangianas [BelHer02, BelHer05] y Proximal Bundle Methods [BorFraLac03] y, más recientemente, a problemas más generales de mercado eléctrico, [Sag12]. Nuestro grupo ha desarrollado implementaciones computacionales preliminares en paralelo del método “Proximal Bundle Method” (*Parallel Proximal Bundle Methods*, PPBM), aplicándose en [HerRen15] a problemas de mercado eléctrico de hasta 1200 escenarios, obteniéndose unos tiempos de ejecución que son un 15% de los tiempo de ejecución mediante técnicas de corte de perspectiva en [CorMijHer13].

A nivel de aplicaciones, contemplamos la solución de problemas de diversos campos usando el algoritmo de punto interior de BlockIP. Hasta ahora dicho algoritmo ha sido ya aplicado con éxito a problemas de **protección de datos, logísticos** y de **planificación**. En el campo de la protección de datos el grupo tiene amplia experiencia en datos tabulares, tanto usando métodos perturbativos (como Controlled Tabular Adjustment), como no perturbativos (Cell Suppression). En este campo el grupo ha participado en dos proyectos europeos (FP5 y FP7) ha contribuido tanto con artículos (p.e., por citar algunos, [Cas06, Cas07a, GonCas11, CasFraGen14, BaeCasGon15, Cas16, CasVia16, LesCasOga16, BaeCasGon18, CasGon18]), como con software y paquetes basados en optimización; estos paquetes están incluidos en el software Tau-Argus, usado por institutos nacionales de estadística de todo el mundo. En el proyecto se pretende aplicar el método de punto interior de BlockIP a una técnica de protección denominada “interval protection”, así como abordar la protección de microdatos (problema entero), y continuar el trabajo sobre supresión de celdas mediante técnicas de Benders estabilizadas.

También hemos aplicado con éxito BlockIP a **problemas de logística y planificación** de gran dimensión, como por ejemplo a problemas de localización de plantas, [CasNasSal15], solucionando instancias de hasta 600 millones de variables continuas y 600 binarias. Problemas de este tamaño jamás habían sido solucionados hasta el momento, y resultaron ser intratables para los mejores paquetes actuales como CPLEX. Estos resultados nos motivan a intentar aplicar BlockIP en otras aplicaciones como: solución de problemas de transporte masivos en redes bipartitas, y aplicaciones que requieran usar la técnica de generación de columnas (tal y como se muestra en [GonGonMun16]) o generación de cortes.

Recientemente también hemos comenzado a aplicar BlockIP a problemas del campo de **data science**, en particular al problema de “Support Vector Machine (SVM)”. Los resultados preliminares obtenidos hasta el momento actual demuestran que BlockIP es más eficiente que el mejor paquete actual para SVM basado en métodos de punto interior (desarrollado en [WooGon11]). Este trabajo, iniciado en el proyecto MTM2015-65362-R, será continuado en el que estamos proponiendo.

La primer aplicación de los modelos PEM es la integración de energía renovable (PEM-IER) de plantas eólicas (Wind Power Plant, WPP) en los diferentes mercados mayoristas de electricidad, en combinación con sistemas eléctricos de almacenaje de energía (Battery Energy Storage Systems, BESS), formando lo que se conoce como Planta de Producción Virtual (Virtual Power Plant, VPP). El trabajo [HerRieMat15] realizado en nuestro grupo demuestra la viabilidad económica de este tipo de VPP y en [HerCuaCor18] se propuso recientemente un modelo de PEM para una VPP que integra completamente la operación detallada de la batería en un modelo multietapa. No se conoce ningún otro trabajo en el que se aborde la integración de una VPP planteada aquí mediante modelos de PEM. Las compañías generadoras que colaboran con nuestro grupo poseen unidades de generación tanto eólicas como térmicas por lo que planteamos en este proyecto la integración de la

generación eólica y térmica en la oferta al mercado eléctrico. Nos basaremos en los modelos de programación estocástica para oferta térmica desarrollados en nuestro grupo: modelos bi-etapa para problemas de oferta óptima de unidades térmicas [HerRidCor10, CorHer10, CorHer11, CorHerMij11, CorHerCif12, HerRidCor12, HerCifCor14]. En [HerCifCor18] se presenta un innovador modelo de media de riesgo de emisiones denominado CEaR. La idea de este enfoque es tomar la formulación de PEM de [CorHerMij11], junto con la formulación de riesgo de emisiones CEaR en [HerCifCor18], mejorado con formulaciones fuertes de las unidades de ciclo combinado siguiendo [MorGenRam15] para integrarlas junto con los modelos de PEM para parques eólicos de [HerCuaCor18].

La segunda aplicación de los modelos PEM es el diseño estratégico de una cadena de suministro (PEM-DECS) en base a dos estrategias contrapuestas de producción: Speculation y Postponement. En líneas generales, el principio de la estrategia Speculation radica en la finalización de productos y su movimiento hacia delante en la cadena cuanto antes posible mientras que la estrategia Postponement radica en la espera de producción semi-acabada a las órdenes de compra, de manera que la producción se define y se completa una vez ha sido demandada. Varias formulaciones se han propuesto para abordar el estudio de Speculation y Postponement mediante programación estocástica [BilMurZha06, BisSuw10, KorYamSel11] y con medidas de aversión al riesgo tanto desde el enfoque CVaR, [CarRibHam10], como desde el enfoque de la dominación estocástica, [EscMonRom17]. Nuestro grupo, dentro del proyecto de investigación con Accenture Techlabs desarrolló la modelización de una red flexible de cadena de suministro con un nuevo enfoque del tratamiento del dilema de Speculation/Postponement a través de la programación estocástica bi-etapa. Se aplicó este modelo de dos etapas a la resolución de varios casos reales de impresión 3D proporcionados por Accenture [RamMugGim16]. En el actual proyecto nos planteamos extender el trabajo descrito abordando el problema del diseño estratégico de cadena de suministro a través de su formulación como problema PEM. No se conoce ningún estudio que aborde el problema bajo esta óptica.

Grupos que trabajan en el tema o temas afines

Entre los autores que trabajan en algoritmos de punto interior por métodos iterativos destacan el Prof. J. Gondzio (School of Mathematics, University of Edinburgh), que ha trabajado en el uso de preconditionadores [Gon12]; en la aplicación a problemas de datos [FouGon15a, FouGon15b]; demostrando la convergencia de métodos de punto interior basados en métodos iterativos y soluciones inexactas de los sistemas de Newton [Gon13]; y aplicando eficientemente métodos de punto interior en la solución de problemas MILP y combinatorios [MunGon13]. También citamos al Prof. A. Oliveira, que desarrolló un preconditionador tipo “splitting” para métodos de punto interior [OliSor05]. En España pocos investigadores trabajan en métodos de punto interior. Entre ellos destacamos al Prof. F.J. Prieto (Dpto. de Estadística, Universidad Carlos III de Madrid) por sus contribuciones en optimización no lineal por punto interior.

El número de grupos que trabajan en el campo de la protección de datos estadísticos es relativamente pequeño, y varios están en España. El más importante es el del Prof. J. Domingo (Dpto. de Informática y Matemáticas, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona), que trabaja en protección de microdatos. El Prof. Domingo dirige la cátedra UNESCO de Privacidad de Datos. También citamos a los Profs. M. Fischetti (Universita di Padova, Italia) y J.J. Salazar (Dpto. de Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna) que en el pasado trabajaron en métodos para supresión de celdas [FisSal99, FisSal03].

Uno de los grupos más relevante a nivel mundial en el área de generación de árboles de escenarios es el del Werner Römisch Humboldt-Universität zu Berlin. En el seno de su grupo se han desarrollado los algoritmos de generación y reducción de escenarios que se considerarán en este proyecto [HeiRom09]. Por lo que se refiere a los algoritmos PBFC, estos fueron propuestos por el grupo de los profesores Alonso Ayuso y Laureano Escudero de la Universidad Rey Juan Carlos [AloEscOrt03]. Un grupo especialmente activo en el uso de métodos especializados para problemas MINLP en el ámbito de la energía es el del profesor Prof. Antonio Frangioni (Università di Pisa, Italia) [BorFraLac03]. El profesor

Claudio Gentile (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia) junto con el grupo del Prof. Andres Ramos (Universidad Pontificia Comillas, Madrid) han desarrollado las formulaciones fuertes del problema del Unit Commitment [MorGenRam15]. Tanto los profesores Gentile como Frangioni colaboran en este proyecto. Los problemas de integración de renovables han sido tratados por el grupo del Profesor Contreras (Universidad Castilla La Mancha) y, recientemente, por el grupo del Profesor Marcos Julio Rider (University of Campinas, Brasil) [MacFraRid15], colaborador de este proyecto.

El grupo solicitante mantiene contacto con la mayoría de grupos citados anteriormente.

Bibliografía

Se destacan en negrita los identificadores de las aportaciones al tema realizadas por miembros del equipo solicitante. Serán citadas en secciones sucesivas.

- [AldEscMer13] U. Aldasoro, L.F. Escudero, M. Merino, G. Pérez, An algorithmic framework for solving large-scale multistage stochastic mixed 0-1 problems with nonsymmetric scenario trees. Part II: Parallelization, *Computers and Operations Research*, 40, 2950-2960, 2013.
- [AldEscMer17] U. Aldasoro, L.F. Escudero, M. Merino, G. Pérez, A parallel Branch-and-Fix Coordination based matheuristic algorithm for solving large sized multistage stochastic mixed 0-1 problems, *European Journal of Operational Research*, 258, 590-606, 2017.
- [AloEscOrt03] A. Alonso-Ayuso, L.F. Escudero, M.T. Ortuño, BFC, A branch-and-fix coordination algorithmic framework for solving some types of stochastic pure and mixed 0-1 programs, *European Journal of Operational Research*, 151, 503-519, 2003.
- [AppArc16]** D. Applegate, A. Archer, V. Gopalakrishnan, S. Lee, K. K. Ramakrishnan, Optimal content placement for a large-scale VoD system, *IEEE/ACM Trans. Networks*, 24, 2114-2127, 2016.
- [BaeCasGon15]** D. Baena, J. Castro, J.A. González, Fix-and-relax approaches for controlled tabular adjustment, *Computers & Operations Research*, 58, 41-52, 2015.
- [BaeCasGon18]** D. Baena, J. Castro, J.A. González, Symmetric vs asymmetric protection levels in SDC methods for tabular data, *Lecture Notes in Computer Science*, 11126, 3–12, 2018.
- [BelHer02]** C. Beltran, F.J. Heredia, Unit Commitment by Augmented Lagrangian Relaxation: Testing Two Decomposition Approaches, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 112(2), 295-314, 2002.
- [BelHer05]** C. Beltran, F.J. Heredia, An Effective Line Search for the Subgradient Method, *Journal of optimization theory and applications*, 125(1), 1–18., 2005.
- [BilMurZha06] S. Biller, A. Muriel, Y. Zhang, Impact of price postponement on capacity and flexibility investment decisions, *Production and Operations Management*, 15(2), 198-214, 2006.
- [BisSuw10] E.K. Bish, R. Suwandechochai, Optimal capacity for substitutable products under operational postponement, *European Journal of Operational Research*, 207, 775-783, 2010.
- [Bix02] R. E. Bixby, Solving real-world linear programs: a decade and more of progress, *Operations Research*, 50, 3-15, 2002.
- [BocCasOli13]** S. Bocanegra, J. Castro, A.R.L. Oliveira, Improving an interior-point approach for large block-angular problems by hybrid preconditioners, *European Journal of Operational Research*, 231, 263-273, 2013.
- [BorFraLac03]** A. Borghetti, A. Frangioni, F. Lacalandra, C.A. Nucci, Lagrangian Heuristics Based on Disaggregated Bundle Methods for Hydrothermal Unit Commitment, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1 (18), 313-323, 2003.
- [CarRibHam10] M.C. Carneiro, G.P. Ribas, S. Hamacher, Risk Management in the Oil Supply Chain: A CVaR approach, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 3286-3294, 2010.
- [Cas00]** J. Castro, A specialized interior-point algorithm for multicommodity network flows, *SIAM J. on Optimization*, 10(3), 852-877, 2000.

- [Cas03a]** J. Castro, Solving quadratic multicommodity problems through an interior-point algorithm, *System Modelling and Optimization-Proceedings of IFIP 2001*, Kluwer, 199-212, 2003.
- [Cas03b]** J. Castro, Solving difficult multicommodity problems through a specialized interior-point algorithm, *Annals of Operations Research*, 124, 35-48, 2003.
- [Cas05]** J. Castro, Quadratic interior-point methods in statistical disclosure control, *Computational Management Science*, 2(2), 107-121, 2005.
- [Cas06]** J. Castro, Minimum-distance controlled perturbation methods for large-scale tabular data protection, *European Journal of Operational Research*, 171, 39-52, 2006.
- [Cas07a]** J. Castro, A shortest paths heuristic for statistical disclosure control in positive tables, *INFORMS Journal on Computing*, 19(4), 520-533, 2007.
- [Cas07b]** J. Castro, An interior-point approach for primal block-angular problems, *Computational Optimization and Applications*, 36, 195-219, 2007.
- [Cas10]** J. Castro, Statistical disclosure control in tabular data, *Privacy and Anonymity in Information Management Systems: New Techniques for New Practical Problem*, Springer (2010), 113-131. ISBN 978-1849962377.
- [Cas11]** J. Castro, Extending controlled tabular adjustment for non-additive tabular data with negative protection levels, *Statistics and Operations Research Transactions - SORT*, 35, 3-20, 2011.
- [Cas12]** J. Castro, Recent advances in optimization techniques for statistical tabular data protection, *European Journal of Operational Research*, 216, 257-269, 2012
- [Cas14]** J. Castro, A CTA model based on the Huber function, *Lecture Notes in Computer Science*, 8744, 79-88, 2014.
- [Cas16]** J. Castro, Interior-point solver for convex separable block-angular problems, *Optimization Methods & Software*, 31, 88–109, 2016.
- [CasBae08]** J. Castro and D. Baena, Using a Mathematical Programming Modeling Language for Optimal CTA, *Lecture Notes in Computer Science*, 5262, 1-12, 2008.
- [CasCue10]** J. Castro, J. Cuesta, Existence, uniqueness and convergence of the regularized primal-dual central path, *Operations Research Letters*, 38, 366-371, 2010.
- [CasCue11]** J. Castro, J. Cuesta, Quadratic regularizations in an interior-point method for primal block-angular problems, *Mathematical Programming*, 130, 415-445, 2011.
- [CasCue12]** J. Castro, J. Cuesta, Improving an interior-point algorithm for multicommodity flows by quadratic regularizations, *Networks*, 59, 117-131, 2012.
- [CasCue13]** J. Castro, J. Cuesta, Solving L_1 -CTA in 3D tables by an interior-point method for primal block-angular problems, *TOP*, 21, 25-47, 2013.
- [CasFraGen14]** J. Castro, A. Frangioni, C. Gentile, Perspective reformulations of the CTA problem with L_2 distances, *Operations Research*, 62(4), 891-909, 2014.
- [CasGon14]** J. Castro, J.A. González, Assessing the information loss of controlled tabular adjustment in two-way tables, *Lecture Notes in Computer Science*, 8744, 11-23, 2014.
- [CasGon18]** J. Castro, J. A. González, A linear optimization based method for data privacy in statistical tabular data, *Optimization Methods & Software*, (2017), in press, doi:10.1080/10556788.2017.1332620.
- [CasNas15]** J. Castro, S. Nasini, Mathematical programming approaches for classes of random network problems, *European Journal of Operational Research*, 245, 402-414, 2015.
- [CasNas17]** J. Castro, S. Nasini, On geometrical properties of preconditioners in IPMs for classes of block-angular problems, *SIAM Journal on Optimization*, 27, 1666–1693, 2017.
- [CasNasSal17]** J. Castro, S. Nasini, F. Saldanha-da-Gama, A cutting-plane approach for large-scale capacitated multi-period facility location using a specialized interior-point method, *Mathematical Programming (series A)*, 163, 411-444, 2017.
- [CasVia16]** J. Castro, A. Via, Revisiting interval protection, a.k.a. partial cell suppression, for tabular data, *Lecture Notes in Computer Science*, 9867, 3-14, 2016.
- [Cor11]** C. Corchero, Short term bidding strategies for a generation company in the iberian electricity market, Ph. D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.

- [CorHer10]** C. Corchero, F.J. Heredia, Optimal Day-Ahead Bidding in the MIBEL's Multimarket Energy Production System, 7th Conference on European Energy Market EEM10, Madrid, 1, 1 – 6, 2010.
- [CorHer11]** C. Corchero, F.J. Heredia, A Stochastic Programming Model for the Thermal Optimal Day-Ahead Bid Problem with Physical Futures Contracts, *Computers & Operations Research*, 38(11), 1501-1512, 2011.
- [CorHerCif12]** C. Corchero, F.J. Heredia, J. Cifuentes, Optimal electricity market bidding strategies considering emission allowances, 9th International Conference on the European Energy Market (EEM 2012), Florence, 1-8, 2012.
- [CorHerMij11]** C. Corchero, F.J. Heredia, E. Mijangos, Efficient Solution of Optimal Multimarket, 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), Zagreb, 2011.
- [CorMijHer13]** C. Corchero, E. Mijangos, F.J. Heredia, A new optimal electricity market bid model solved through perspective cuts, *TOP*, 21(1), 25, 2013.
- [DupConWal00] J. Dupacova, G. Consigli, S.W. Wallace, Scenarios for multistage stochastic programs, *Ann. Oper. Res.*, 100(1-4), 25–53, 2000.
- [EscGarMer12] L.F. Escudero, M.A. Garín, M. Merino, G. Pérez, An algorithmic framework for solving large scale multi-stage stochastic mixed 0-1 problems with nonsymmetric scenario trees, *Computers and Operations Research*, 39(5), 1133-1144, 2012.
- [EscMonRom17] L.F. Escudero, J.F. Monge, D. Romero, On the time-consistent stochastic dominance risk aversion measure for tactical supply chain planning under uncertainty, *Computers and Operations Research*, 100, 270-286, 2018.
- [FisSal99] M. Fischetti and J.J. Salazar, Models and algorithms for the 2-dimensional cell suppression problem in statistical disclosure control, *Mathematical Programming*, 84, 283-312, 1999.
- [FisSal03] M. Fischetti, J.J. Salazar, Partial cell suppression: a new methodology for statistical disclosure control, *Statistics and Computing* 13, 13-21, 2003.
- [FouGon15a] K. Fountoulakis, J. Gondzio, Performance of first- and second-order methods for big data optimization, *Computational Optimization and Applications* 65, 605—635, 2016.
- [FouGon15b] K. Fountoulakis and J. Gondzio, A Second-Order Method for Strongly Convex L1-Regularization Problems, *Mathematical Programming A*, 156, 189-219, 2016.
- [FraGen06a]** A. Frangioni, C. Gentile, Perspective Cuts for a Class of Convex 0-1 Mixed Integer Programs, *Mathematical Programming* 106(2), 225 - 236, 2006.
- [GilMei05] P. Gilbert, E. Meijer, Time Series Factor Analysis with an Application to Measuring Money, Research Report N° 05F10. University of Groningen, SOM Research School, 2005.
- [Gon12] J. Gondzio, Matrix-free interior point method, *Computational Optimization and Applications* 51, 457-480, 2012.
- [Gon13] J. Gondzio, Convergence analysis of an inexact feasible interior point method for convex quadratic programming, *SIAM Journal on Optimization* 23(3), 1510-1527, 2013.
- [GonCas11]** J. A. González, J. Castro, A heuristic block coordinate descent approach for controlled tabular adjustment, *Computers & Operations Research*, 38, 1826-1835, 2011.
- [GonGonMun16] J. Gondzio, P. González-Brevis and P. Munari, Large-scale optimization with the primal-dual column generation method, *Mathematical Programming Computation* 8, 47-82, 2016.
- [HeiRom09] H. Heitsch, W. Römis, Scenario tree modeling for multistage stochastic programs, *Mathematical Programming*, 118(2), 371–406, 2009.
- [HerCifCor14]** F.J. Heredia, J. Cifuentes, C. Corchero, Stochastic Optimal Bid to Electricity Markets with Emission Risk Constraints, 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies, Barcelona, 2014.
- [HerCifCor18]** F.J. Heredia, J. Cifuentes, C. Corchero, Stochastic optimal generation bid to electricity markets with emission risk constraints, *Journal of Environmental Management*, 207(1), 432-443, 2018.
- [HerCua17]** F.J. Heredia, M.D. Cuadrado, A multistage stochastic programming model for the optimal management of wind-BESS virtual power plants, *WindFarms 2017*, Madrid, 2017.

- [HerCuaCor18]** F.J. Heredia, M.D. Cuadrado, C. Corchero, On the optimal participation in electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems, *Computers and Operations Research*, 96, 316-329, 2018.
- [HerRen15]** F.J. Heredia, A. Rengifo, Parallel Proximal Bundle Methods for Stochastic Electricity Market Problems, *27th European Conference on Operational Research*, Glasgow, 2015.
- [HerRidCor10]** 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*, 25(3), 1504-1518, 2010.
- [HerRidCor12]** 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, *Annals of Operations Research*, 193(1), 107-127, 2012.
- [HerRieMat15]** F.J. Heredia, J. Riera, M. Mata, J. Escuer, J. Romeu, Economic analysis of battery electric storage systems operating in electricity markets, *12th International Conference on the European Energy Market (EEM15)*, Lisbon, 1- 5, 2015.
- [KauWal03] M. Kaut, S.W. Wallace, Evaluation of scenario-generation methods for stochastic programming, *Technical Report 14, SPEPS Working Paper*, 2003.
- [KorYamSel11] E. Körpeoglu, H. Yaman, M. Selim, A multi-stage stochastic programming approach in master production scheduling, *European Journal of Operations Research* 213, 166-179, 2011.
- [LesCasOga16]** G. Lesaja, J. Castro, A. Oganian, A second order cone formulation of continuous CTA model, *Lecture Notes in Computer Science*, 9867 (2016) 41–53.
- [MacFraRid15]** L.H. Macedo, J.F. Franco, M.J. Rider, R. Romero, Optimal Operation of Distribution Networks Considering Energy Storage Devices, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6), 2015
- [Mij13]** E. Mijangos, An Algorithm for Two-Stage Stochastic Quadratic Problems, *System Modeling and Optimization*, 391, 177-187, 2013.
- [Mij15]** E. Mijangos, An algorithm for two-stage stochastic mixed-integer nonlinear convex problems, *Annals of Operations Research*, 235(1), 581-598, 2015.
- [Mij16]** E. Mijangos, Solving Multistage Nonlinear Convex Stochastic Problems, *Informatica* 27(4), 799-818, 2016.
- [MINECO17] Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2017-2020, Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, 2017.
- [MorGenRam15]** G. Morales-España, C. Gentile, A. Ramos, Tight MIP formulations of the power-based unit commitment problem, *OR Spectrum*, 37, 929–950, 2015.
- [MunGon13] P. Munari, J. Gondzio, using the primal-dual interior point algorithm within the branch-price-and-cut method, *Computers and Operations Research* 40(8), 2026–2036, 2013.
- [MuñSan12]** M.P. Muñoz, J.A. Sánchez, Forecasting Wind Power by means of Markov switching models, *ISBIS*, 2012.
- [MuñCorHer13]** M.P. Muñoz, C. Corchero, F.J. Heredia, F.J., Improving electricity market price forecasting with factor models for the optimal generation bid, *International Statistical Review*, 81(2), 289-306, 2013.
- [OliSor05] A.R.L. Oliveira, D.C. Sorensen, A new class of preconditioners for large-scale linear systems from interior point methods for linear programming, *Linear Algebra and its Applications*, 394, 1-24, 2005.
- [PagPerTom15] A. Pagès-Bernaix, G. Pérez-Valdés, A. Tomsgard, A parallelised distributed implementation of a branch-and-fix coordination algorithm, *European Journal of Operational Research*, 244, 77-85, 2015.
- [Pfl01] G.C. Pflug, Scenario tree generation for multiperiod financial optimization by optimal discretization, *Mathematical programming*, 89(2), 251–271, 2001.
- [RamMugGim16] D. Ramon, A. Muguruza, R. Gimeno, P. Guo, M. Hamilton, K. Shastry, S. Webb, J. Minguella, F.J. Heredia, Optimal Supply Chain Strategy and Postponement Degree with 3D Printing, *28th European Conference on Operational Research*, Poznan, 330, 2016.
- [Sag12] C. Sagastizabal, Divide to conquer: decomposition methods for energy optimization, *Mathematical Programming B*, 134, 187–222, 2012.
- [SanMuñMar13]** J.A. Sánchez, M.P. Muñoz, M.D. Márquez, Non linear statistical models to improve wind power forecasts, *59th ISI World Statistics Congress*. Hong Kong, 2013.

- [Sha06] A. Shapiro, On complexity of multistage stochastic programs, *Operations Research Letters*, 34(1), 1–8, 2006.
- [WooGon11] K. Woodsend, J. Gondzio, Exploiting Separability in Large Scale Linear Support Vector Machine Training, *Computational Optimization and Applications* 49, 241–269, 2011.
- [Wri97] S. J. Wright, *Primal-Dual Interior-Point Methods*, SIAM, 1997.

2. Hipótesis de partida, objetivos generales y adecuación

2. La hipótesis de partida y los objetivos generales perseguidos, así como la adecuación del proyecto a la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación y, en su caso, a Horizonte 2020 o a cualquier otra estrategia nacional o internacional de I+D+i. Si la memoria se presenta a la convocatoria de «RETOS INVESTIGACIÓN», deberá identificarse el reto cuyo estudio se pretende abordar y la contribución de la propuesta a las necesidades del mismo, así como la relevancia social o económica prevista.

Hipótesis de partida

La propuesta actual está realizada por dos grupos que en el pasado han obtenido proyectos por separado: un grupo especialmente centrado en métodos de punto interior y sus aplicaciones, el otro en métodos para problemas estocásticos y sus aplicaciones; los dos, por tanto, están interesados en métodos de optimización de gran escala para problemas estructurados. El grupo centrado en punto interior ha sido financiado por los proyectos MEC MTM2006-05550 (de 2006 a 2009), MICINN MTM2009-08747 (2009-12), MINECO MTM2012-31440 (2013-15) y MINECO MTM2015-65362-R (2015-18). El grupo centrado en optimización estocástica fue financiado por los proyectos MEC TAP99-1075-C02-01 (de 2000 a 2002), DPI2002-03330 (de 2003 a 2005), DPI2005-09117-C02-01 (de 2006 a 2008), DPI2008-02153 (de 2009 a 2011) y MTM2013-48462-C2-1-R (de 2014 a 2016). Los proyectos anteriores y el actual han dado lugar, entre otras, a las publicaciones resaltadas en negrita en la bibliografía del final de la sección 1. La propuesta actual continúa esta línea de investigación, pero, aborda nuevos objetivos, tanto a nivel metodológico como de aplicaciones.

El grupo tiene amplia experiencia en el desarrollo e implementación de métodos de punto interior para problemas estructurados. El método de punto interior implementado en el paquete BlockIP está reconocido internacionalmente como el mejor algoritmo para ciertos tipos de problemas (ver entre otros [BocCasOli13, Cas00, Cas03a, Cas03b, Cas07b, Cas16, CasCue10, CasCue11, CasCue12, CasCue13, CasNas15, CasNas17, CasNasSal17]). Con este algoritmo el grupo ha solucionado problemas lineales y cuadráticos de decenas de millones de variables [Cas15, CasCue13, CasNas15, CasNas17], resultando ser hasta 2000 veces más rápido que sistemas comerciales como CPLEX. BlockIP también se usó con éxito en una descomposición de Benders para problemas de localización de plantas de 600 millones de variables continuas y 600 binarias, que fueron intratables para CPLEX [CasNasSal17]. Gracias a estos resultados, hemos sido invitados a dar charlas como keynote speaker en workshops y seminarios internacionales (1st Brazilian Workshop on Interior Point Methods en 2015; University of Edinburgh en 2012 y 2015; Google Inc , New York offices, en 2018).

El grupo también es reconocido internacionalmente por sus contribuciones al desarrollo de técnicas de optimización y su aplicación a problemas de protección de datos. Entre sus publicaciones recientes en este campo hallamos [Cas05, Cas06, Cas07a, CasBae08, Cas10, Cas11, GonCas11, Cas12, CasCue13, Cas14, CasFraGen14, CasGon14, BaeCanGos15, CasVia16, LosCasOga16, BaeCasGon18, CasGon18]. En este campo el grupo ha participado en dos proyectos europeos (FP5 y FP7), ha conseguido 8 convenios con institutos nacionales de estadística y Eurostat (actualmente negociando uno con European Central Bank), y fue invitado a dar una charla en febrero de 2018 en el National Statistics Center of Japan (Tokyo).

El grupo es también puntero en sus contribuciones a la modelización de problemas de Programación Estocástica bi-etapa a problema de oferta óptima a mercados eléctricos (ver [HerRidCor10, CorHer10, CorHer11, CorHerMij11, CorHerCif12, HerRidCor12]), en la modelización matemática del riesgo de emisiones contaminantes [HerCifCor14, HerCifCor18] y, recientemente, en la modelización de la oferta óptima de generación eólica [HerRieMat15, HerCuaCor18]. También cuenta con una amplia experiencia por lo que se refiere a la resolución mediante algoritmos especializados de problemas, tanto deterministas como de PEM estructurados, que sería imposible resolver con optimizadores comerciales (ver [BelHer02, BelHer05, CorHerMij11, CorHerMij13, Mij13, Mij15, Mij16, HerRen15]).

Objetivos generales

El objetivo general del proyecto es el desarrollo de métodos de optimización eficientes (por punto interior, Branch&Fix Coordination, Proximal Bundle Methods) para problemas estructurados que, por su dimensión y/o dificultad, no han sido abordados anteriormente en la literatura, así como su aplicación a problemas reales. En particular, estamos pensando en problemas de entre decenas y miles de millones de variables y restricciones, como los que se considerarán de los campos: de protección de datos (protección por intervalos, ajuste controlado de tablas, supresión de celdas, microagregación); ciencia de datos (support vector machines); programación estocástica (integración de energías renovables en sistemas y mercados energéticos, diseño óptimo de cadena de suministro y distribución); logística (transporte). Por lo tanto, el proyecto se enmarca en la frontera del conocimiento en optimización computacional y sus aplicaciones.

Adecuación

Dado que los métodos de optimización a ser desarrollados (1) suponen un avance significativo del conocimiento, permitiendo solucionar problemas inabordables hasta el momento, y (2) son transversales, pudiendo ser aplicados a diferentes campos, el proyecto podría enmarcarse dentro del Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+I [MINECO17 (sección 6.2)].

Sin embargo, las aplicaciones consideradas en el proyecto pueden agruparse en dos grandes bloques: (1) ciencia de datos, protección de datos, planificación de la producción, cadena de suministro y logística por un lado; y (2) generación de energía y energías renovables, por otro. Estos dos bloques encajan en los retos en Economía, Sociedad y Cultura Digitales [MINECO17, sección 6.4.3, reto 7] y Energía Segura, Eficiente y Limpia [MINECO17, sección 6.4.3, reto 3]. En particular:

- Las técnicas de protección de datos se adecúan a la prioridad temática VII (Ciberseguridad, biometría e Identidad Digital) del reto 7, que contempla “el desarrollo de entornos seguros ligados a los derechos de los ciudadanos”. Las aplicaciones en ciencia de datos se adecúan a la prioridad temática IV que incluye “tecnologías de procesamiento masivo de datos”. Las aplicaciones en logística y optimización en redes se incluirían en la prioridad III “desarrollo de servicios, procesos [...] y la optimización de crecimiento asociado y su impacto en la creación de empleo y actividad económica”. Y el desarrollo de nuevos métodos de optimización para problemas de gran escala se adecúa a la prioridad V “high performance computing”.
- La formulación y resolución de integración de energías renovables mediante PEM se alinea con los objetivos del reto Reto (3): Energía segura, eficiente y limpia. Contribuyendo a la lucha contra el cambio climático mediante modelos matemáticos y computacionales que mejoren la integración de la generación y suministro de energías limpias (eólica, fotovoltaica) de forma competitiva en el mercado eléctrico. En concreto, permitirá avanzar en las prioridades consistente en El desarrollo de la próxima generación de TECNOLOGÍAS DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL DISEÑO DE REDES Y SISTEMAS DE GESTIÓN FLEXIBLES Y DISTRIBUIDOS y a la REDUCCIÓN, CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO Este proyecto se enmarca dentro de las actividades transversales mencionadas en el reto, vinculadas a la supercomputación, bigdata y la digitalización y despliegue de redes inteligentes.

- La resolución del problema de diseño estratégico de la cadena de suministro mediante PEM se alinea con el Reto (7): Economía y sociedad digital, especialmente en los ámbitos iv “Desarrollo, innovación y adopción de SOLUCIONES Y TECNOLOGÍAS ligadas TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO MASIVO DE DATOS E INFORMACIÓN” y al ámbito v. “El desarrollo de tecnologías, productos y servicios asociados a la COMPUTACIÓN DE ALTO RENDIMIENTO (high performance computing)”.

3. Objetivos específicos

3. Los objetivos específicos, enumerándolos brevemente, con claridad, precisión y de manera realista (acorde con la duración prevista del proyecto).

En los proyectos con dos investigadores principales, deberá indicarse expresamente de qué objetivos específicos se hará responsable cada uno de ellos.

Se marca en cada tarea si el responsable es Jordi Castro (JC) o F.Javier Heredia (JH).

1. Adición de restricciones cuadráticas en el método de punto interior especializado. Inclusión en BlockIP. (JC)
2. Mejora del método de punto interior especializado (implementado en el paquete BlockIP) mediante el desarrollo de nuevos preconditionadores. Estudio de su aplicabilidad en métodos de generación de columnas o cortes. (JC)
3. Paralelización del algoritmo de punto interior especializado; implementación paralela de BlockIP. (JC)
4. Solución de problemas de protección de datos. (a) Datos tabulares mediante las técnicas de: protección por intervalos (o supresión de celdas parcial) en datos tabulares utilizando el algoritmo de BlockIP; supresión de celdas, utilizando técnicas de generación de cortes. (b) Microdatos mediante microagregación usando un nuevo modelo desarrollado en el proyecto anterior. Evaluación y comparación de los métodos, usando tablas reales proporcionadas por institutos de estadística. (JC)
5. Solución de problemas logísticos en redes (de transporte lineales y cuadráticos en redes bipartitas; y de localización de contenidos [AppArc16]), de muy gran dimensión utilizando el algoritmo de punto interior especializado. (JC)
6. Solución de problemas de “support vector machine” utilizando el algoritmo de punto interior especializado. (JC)
7. Aplicación del método de punto interior especializado para la solución de problemas de optimización estocástica. (JC)
8. Formulación de modelos PEM: mejora de los modelos de previsión de las variables aleatorias; para generación eólica, combinación de los modelos estadísticos con los modelos físicos; obtención de previsiones de precios del mercado eléctrico mediante técnicas TSFA; estudio y evaluación de las diversas técnicas de generación de árboles de escenarios y determinación de las más apropiadas para las aplicaciones consideradas. (JH)
9. Formulación de un modelo de PEM de (a) el problema de diseño estratégico de la cadena de suministro incluyendo medidas de aversión al riesgo basadas en técnicas de control de CVaR y dominancia estocástica y (b) el problema de la integración de energías renovables y térmicas con formulaciones fuertes de unidades de ciclo combinado, condiciones de riesgo CVaR de beneficios i CEaR de emisiones. (JH)
10. Algoritmos de optimización especializados para los problemas PEM: diseño e implementación en C++ del algoritmo de PBFC con problemas convexos. Implementación en C++ del algoritmo PPBM. (JH)

4. Metodología y plan de trabajo

4. El detalle de la metodología propuesta, incluyendo la viabilidad metodológica de las tareas. Si fuera necesario, también se incluirá una evaluación crítica de las posibles dificultades de un objetivo específico y un plan de contingencia para resolverlas.

Metodología

Las etapas del método de trabajo que se utilizará (las habituales en optimización computacional) son:

1. Estudio bibliográfico de antecedentes.
2. Desarrollo, diseño y análisis de algoritmos, y sus aplicaciones. Esta es la etapa principal.
3. Evaluación computacional preliminar de los métodos del punto 2 (usando un prototipo, codificado en MATLAB o AMPL). Ajuste de los métodos.
4. Implementación eficiente y robusta (en C/C++) de los métodos del punto 3.
5. Evaluación computacional de los métodos implementados en el punto 4 utilizando conjuntos de datos reales de gran dimensión, suministrados por entidades, centros de investigación, o repositorios on-line. En el caso de que los resultados no sean satisfactorios, se volverá a la etapa 2 para modificar oportunamente los algoritmos desarrollados.
6. Comparación de los métodos obtenidos con otras alternativas.
7. Difusión y explotación de los métodos desarrollados en revistas y congresos especializados. Posibilidad de transferencia de tecnología con las implementaciones realizadas.

Las etapas 2 a 6 se solaparán en el tiempo, para evitar entrar en una dinámica iterativa de evaluación y cambio. La etapa 7, de difusión y explotación, también se realizará a medida que avance el proyecto.

Plan de trabajo

Se listan las tareas a desarrollar, desglosadas en subtareas. La mayoría de las tareas son ejecutadas en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), y unas pocas en la Universidad del País Vasco (UPV). Para cada subtarea se indica el personal asignado, subrayando la persona responsable, y los hitos perseguidos. Se lista a continuación el personal involucrado en el equipo de trabajo, indicando su afiliación, y el acrónimo que se utilizará para referenciarlo en el plan de trabajo y en el cronograma de la Sección 4.1:

- Dr. Daniel Baena, UPC y Transports Metropolitans de Barcelona. (DB).
- Sr. Carlos Becerril, doctorando en UPC. (CB).
- Dr. Jordi Castro (IP1), UPC. (JC)
- Sra. Marlyn Cuadrado, doctoranda en UPC. (MC).
- Dr. Antonio Frangioni, Università di Pisa, Italia. (AF).
- Dr. Claudio Gentile, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia. (CG).
- Dr. J. Antonio González, UPC. (JAG).
- Dr. F. Javier Heredia (IP2), UPC. (FJH).
- Sra. Paula Lama, doctoranda en UPC. (PL).
- Dr. Eugenio Mijangos, Euskal Herriko Unibertsitatea. (EM).
- Dr. Stefano Nasini, IESEG School of Management, Lille, France. (SN).
- Sr. Daniel Ramón, doctorando en UPC. (DR).
- Dr. Marcos J. Rider, University of Campinas, Brasil (MJR).
- Dr. Luís F. Urquiza, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. (LFU).

De los cuatro doctorandos de la UPC, PL está siendo supervisada por el IP1, MC y DR por el IP2, y CB por los dos IPs. Los doctores DB y SN fueron supervisados por el IP1. El doctor MJR realizó una estancia post-doc supervisado por el IP2. El doctor LFU realizó su tesis de máster dirigido por el IP1.

Tarea T0. Gestión y explotación del proyecto.

- **Centro ejecutor:** UPC
- **Duración:** meses 1 a 48
- **Subtareas:**

T0.1 Preparación de informes anuales de seguimiento e informe final.

Personas involucradas: JC, JH.

T0.2 Relación con las entidades interesadas en el proyecto, para análisis de requisitos, análisis y difusión de resultados, y establecimiento de posibles convenios de transferencia de tecnología.

Personas involucradas: JC, JH.

- **Hitos:**
 - Informes anuales y final.
 - Si da lugar, convenios de transferencia de tecnología.
- **Recursos:** Ordenador.
- **Cronograma:** ver Sección 6.

Tarea T1. Métodos de punto interior para problemas estructurados.

- **Centro ejecutor:** UPC
- **Duración:** meses 6 a 48.
- **Subtareas:**

T1.1 Adición de restricciones cuadráticas al método de punto interior especializado. Implementación eficiente en BlockIP. Estudio de posibles extensiones a problemas de optimización cónica.

Personas involucradas: JC, SN.

T1.2 Desarrollo de nuevas precondiciones para el algoritmo de punto interior especializado. En particular se considerará un preconditionador híbrido que combine el actual por series de potencias y el desarrollado en [CasNas17]. Estudio de la posibilidad de aplicación de dichas técnicas en métodos de generación de columnas/cortes.

Personas involucradas: JC, SN, AF.

T1.3 Paralelización del algoritmo de punto interior especializado para problemas estructurados con restricciones angulares por bloques. Adición de nuevos paquetes de álgebra lineal si fuera necesario para mejorar la paralelización. Versión paralela de BlockIP.

Personas involucradas: JC.

- **Hitos:**
 - Algoritmo de punto interior especializado para restricciones cuadráticas.
 - Algoritmo de punto interior paralelo. Versión paralela de BlockIP.
 - Publicaciones en revistas JCR y ponencias en congresos internacionales.
- **Recursos:** Ordenadores adquiridos con cargo al proyecto (servidor, ordenadores personales). Software: paquetes de optimización (CPLEX, XPRESS), lenguajes de programación (C/C++), paquetes de cálculo matricial (MATLAB). Bibliografía adquirida. Presupuesto para conferencias (viaje, inscripciones y alojamiento).
- **Cronograma:** ver Sección 6.

Task T2. Aplicaciones en protección de datos, ciencia de datos y logística.

- **Centro ejecutor:** UPC
- **Duración:** meses 1 a 48
- **Subtareas:**

T2.1 Solución del problema de protección de datos tabulares mediante: supresión de celdas usando métodos de planos de corte (Benders) estabilizados (aceleración del máster mediante restricciones trust-region/local-branching); "interval protection" gracias a una reformulación block-angular del problema y uso posterior de BlockIP. Análisis de resultados. Comparación de técnicas. Solución de instancias reales.

Personas involucradas: JC, DB, AF, JAG.

- T2.2** Solución del problema de transporte (lineal y cuadrático) en redes bipartitas de muy gran dimensión mediante BlockIP. Reformulación block-angular del problema. Comparación con métodos alternativos (puede incluirse métodos de punto interior especializados para problemas de flujos en redes).
Personas involucradas: JC, SN, AF, CG.
- T2.3** Solución del problema de support vector machine utilizando el método de punto interior especializado en BlockIP. Reformulación eficiente. Comparativa con métodos alternativos. Posibles extensiones a kernels no lineales. Solución de SVMs de gran dimensión usando versión paralela de BlockIP.
Personas involucradas: JC, JAG.
- T2.4** Solución de problemas de optimización estocástica (reformulados como problemas angulares por bloques) mediante el punto interior especializado de BlockIP.
Personas involucradas: PL, JC, JH.
- T2.5** Solución del problema combinatorio de protección de microdatos por microagregación mediante un nuevo modelo desarrollado en el proyecto anterior.
Personas involucradas: CG, JC.
- T2.6** Solución eficiente del problema de localización de contenidos [AppArc16] mediante BlockIP.
Personas involucradas: LFU, JC.
- **Hitos**
 - Algoritmo e implementación basada en BlockIP para SVMs.
 - Algoritmo e implementación basada en BlockIP para problemas de transporte de muy gran dimensión en grafos bipartitos.
 - Algoritmo eficiente e implementación basada en BlockIP para el problema de localización de contenidos.
 - Algoritmo exacto para el problema de microagregación.
 - Algoritmo e implementación basada en BlockIP para optimización estocástica.
 - Algoritmos e implementaciones de métodos para protección de datos tabulares.
 - Publicaciones en revistas JCR y ponencias en congresos internacionales.
 - **Recursos:** Ordenadores adquiridos con cargo al proyecto (servidor, ordenadores personales). Software: paquetes de optimización (CPLEX, XPRESS), lenguajes de programación (C/C++), paquetes de cálculo matricial (MATLAB). Bibliografía adquirida. Presupuesto para conferencias (viaje, inscripciones y alojamiento).
 - **Cronograma:** ver Sección 6.

Tarea T3. Generación de árboles de escenarios para problemas de PEM.

- **Centro ejecutor:** UPC
- **Duración:** meses 1 a 24.
- **Subtareas:**

T3.1 Modelos de previsión. Extensión de los modelos de Markov de cambio de régimen para trabajar con datos de alta frecuencia para previsión de generación eólica. Combinación de los modelos estadísticos (autoregresivos) con los modelos físicos (mediante la inclusión de regresores exógenos) con análisis multivariante previo de las series. Obtención de previsiones de precios del mercado eléctrico y demanda a partir de datos históricos del mercado eléctrico español mediante técnicas TSFA.
Personas involucradas: JAS, MC.

T3.2 Estudio y evaluación de las técnicas de generación de árboles de escenarios backward/forward tree construction algorithms, unconstrained stochastic approximation algorithm y Sample Average Approximation y determinación de las más apropiadas para los problemas PEM-DECS/IER. Generación de escenarios para los problemas PEM-DECS y PEM-IER a partir de los modelos de previsión y datos históricos de las variables aleatorias de los problemas.
Personas involucradas: FJH, MC, DRL.
- **Hitos:**
 - Obtención de códigos en R de predicción de precios de mercado eléctrico y generación eólica.
 - Comunicación en congreso internacional y publicación en revista del JCR.

- **Recursos:** Ordenadores adquiridos con cargo al proyecto (servidor, ordenadores personales). Software: lenguajes de modelización algebraica (AMPL) paquetes de optimización (CPLEX, XPRESS), paquetes de cálculo estadístico (R). Bibliografía adquirida. Presupuesto para conferencias (viaje, inscripciones y alojamiento).
- **Cronograma:** ver Sección 6.

Tarea T4. Aplicaciones de PEM a energía y cadena de suministro.

- **Centro ejecutor:** UPC
- **Duración:** meses 1 a 24
- **Subtareas:**
 - T4.1** Formulación del problema de PEM-IER de integración de una VPP eólica y un parque térmico risk-neutral con formulaciones fuertes de las restricciones unit commitment y condiciones de riesgo de emisiones. Implementación en el lenguaje de programación matemática AMPL y validación del modelo.
Personas involucradas: FJH, MC, MJR, CB, CG.
 - T4.2** Elaborar un modelo base PEM-DECS multietapa risk-neutral para la adecuada identificación de las estrategias speculation/postponment y que incluya (a) perecibilidad de productos, (b) medidas de aversión al riesgo basadas en técnicas de control de CVaR y (c) problemas multi-objetivo, mediante métodos de escalarización basados en el método epsilon-constraint. Implementación en el lenguaje de programación matemática AMPL y validación del modelo.
Personas involucradas: FJH, DRL, CG.
- **Hitos:**
 - Obtención de la descripción matemática, implementación computacional en el lenguaje de programación matemática AMPL y validación con los datos reales proporcionados por las empresas colaboradoras (Naturgy, Accenture).
 - Comunicación en congreso internacional y artículo en revista JCR de los resultados obtenidos.
- **Recursos:** Ordenadores adquiridos con cargo al proyecto (servidor, ordenadores personales). Software: lenguajes de modelización algebraica (AMPL) paquetes de optimización (CPLEX, XPRESS). Bibliografía adquirida. Presupuesto para conferencias (viaje, inscripciones y alojamiento).
- **Cronograma:** ver Sección 6.

Tarea T5. Algoritmos especializados para los problemas PEM-IER / PEM-DECS.

- **Centro ejecutor:** UPC
- **Duración:** meses 24 a 48
- **Subtareas:**
 - T5.1** Diseño e implementación en C++ de un algoritmo PBFC que permita la resolución eficiente de problemas de gran tamaño de programación estocástica mixta multietapa con función objetivo convexa no-lineal y restricciones convexas a fin de resolver los problemas PEM-DECS/IER.
Personas involucradas: EM, FJH.
 - T5.2** Diseño e implementación en C++ de un algoritmo PPBM para los problemas de programación lineal y cuadrática mixta 0-1 de gran dimensión originados por de los problemas PEM-DECS/IER.
Personas involucradas: FJH, EM, AF.
 - T5.3** Comparación de la eficiencia de los métodos PBFC y PPBM en los problemas PEM-IER y PEM-DECS.
Personas involucradas: EM, FJH.
- **Hitos:**
 - Obtención del código C++ del algoritmo PBFC y PPBM adaptado a la resolución de los problemas PEM-IERP y EM-DECS con los datos reales proporcionados por las empresas colaboradoras (Naturgy, Accenture).
 - Comunicación en congreso internacional y artículo en revista JCR de los resultados obtenidos.
- **Recursos:** Ordenadores adquiridos con cargo al proyecto (servidor, ordenadores personales). Software: lenguajes de programación (C/C++), paquetes de optimización

(CPLEX, XPRESS). Bibliografía adquirida. Presupuesto para conferencias (viaje, inscripciones y alojamiento).

- **Cronograma:** ver Sección 6.

5. Medios materiales e infraestructuras disponibles.

5. La descripción de los medios materiales, infraestructuras y equipamientos singulares a disposición del proyecto que permitan abordar la metodología propuesta.

El equipo dispone actualmente de tres servidores Fujitsu Primergy, de 192 y 500 Gigabytes de memoria, y un servidor Dell POWEREDGE R630 de 256 Gigabytes adquiridos en proyectos de investigación anteriores, con los que se intentarán ejecutar los problemas de gran dimensión que se plantean. Dos de estos servidores son antiguos, por lo que se ha presupuestado la compra de un nuevo servidor.

Los miembros del equipo de investigación también disponen de un ordenador personal, una estación de trabajo de sobremesa, y portátiles antiguos para poder iniciar las tareas del proyecto; sin embargo se ha presupuestado la renovación de dicho material.

A nivel de software, se dispone de una licencia comercial (antigua) del lenguaje de modelización AMPL, y licencias académicas gratuitas de los sistemas de optimización CPLEX y Xpress. Se ha presupuestado la actualización de la licencia comercial del lenguaje AMPL.

6. Cronograma

Se subraya el nombre de la(s) persona(s) responsable(s), en cada tarea.

Tareas	Centro	Personas	Primer año	Segundo año	Tercer año	Cuarto año
T0 Gestión y explotación del proyecto	UPC		1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2
T0.1 Generación de informes		<u>JC</u>		x	x	x
T0.2 Relación con entidades		<u>JC</u>	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX
T1 Métodos de punto interior para problemas estructurados	UPC		1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2
T1.1 Adición de restricciones cuadráticas		<u>JC</u> , SN		XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	
T1.2 Desarrollo de nuevos preconditionadores; generación columnas/cortes		<u>JC</u> , SN, AF			XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX
T1.3 Paralelización del algoritmo		<u>JC</u>	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX		
T2 Aplicaciones en protección de datos, ciencia de datos, y logística	UPC		1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2
T2.1 Protección de datos tabulares por supresión de celdas e interval protection.		<u>DB</u> , <u>JC</u> , AF, JAG	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX
T2.2 Problema de transporte de gran dimensión en redes bipartitas		<u>JC</u> , SN, AF, CG	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX		
T2.3 Problema de support vector machines con BlockIP		<u>JC</u> , JAG		XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	
T2.4 Problemas de optimización estocástica con BlockIP		<u>PL</u> , <u>JC</u> , JH	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX		
T2.5 Protección de microdatos por microagregación		<u>CG</u> , <u>JC</u>	XXXXXX	XXXXXXXXXXXX	XXXXXX	
T2.6 Problema de localización de contenidos mediante BlockIP		<u>LFU</u> , <u>JC</u>		XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX	
T3 Generación de árboles de	UPC		1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2

Tareas	Centro	Personas	Primer año	Segundo año	Tercer año	Cuarto año
escenarios para problemas de PEM						
T3.1 Modelos de previsión.		JAS, MC	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX		
T3.2 Generación de árboles de escenarios.		FJH, MC, DRL	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX		
T4 Aplicaciones de PEM a energía y cadena de suministro	UPC		1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2
T4.1 Formulación del problema de PEM-IER y validación con AMPL		FJH, MC, MJR, CB, CG	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX		
T4.2 Formulación del problema de PEM-DECS y validación con AMPL		FJH, DRL	XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX		
T5 Algoritmos especializados para los problemas PEM-IER / PEM-DECS.	UPC		1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2
T5.1 Implementación algoritmo PBFC		EM, FJH			XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX
T5.2 Implementación algoritmo PPBM.		FJH, EM, AF			XXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXX
T5.3 Estudió computacional comparativo algoritmos PBFC y PPBM.		EM, FJH				XXXXXXXXXXXX

2. IMPACTO ESPERADO DE LOS RESULTADOS - EXPECTED RESULTS IMPACT

Impacto científico-técnico y socio-económico

Desde el punto de vista científico-técnico, el proyecto realizará aportaciones en diversos campos. A nivel metodológico, se obtendrán nuevos procedimientos para abordar problemas de optimización jamás solucionados hasta ahora por su gran dimensión (centenares o miles de millones de variables), por lo que el proyecto se enmarca en la frontera del conocimiento en optimización computacional. Todas las mejoras en métodos de punto interior serán añadidas al paquete de optimización BlockIP (<http://www-eio.upc.edu/~jcastro/BlockIP.html>), reconocido como el más eficiente para ciertas clases de problemas. En el área de la programación estocástica, se realizarán aportaciones en la generación de escenarios a partir de modelos estadísticos de previsión y en el desarrollo de algoritmos especializados para problemas de grandes dimensiones. En el ámbito de Supply Chain Management se espera desarrollar modelos originales de diseño de cadena de producción y distribución con una representación explícita de las estrategias *speculation/postponement*. En el ámbito de la energía, se espera obtener modelos innovadores de integración de generación eólica, térmica y almacenamiento eléctrico en el complejo entramado de mercados eléctricos.

Desde un punto de vista socio-económico, este proyecto se encuadra en los retos (7) “Economía y sociedad digital” y (3) “Energía segura, eficiente y limpia”. El hecho de contar con métodos de optimización eficientes de gran dimensión permitirá solucionar problemas más realistas, hasta ahora no planteados, de diferentes campos, entre ellos: planificación de la producción, generación eléctrica, confidencialidad de datos, ciencia de datos, y logística.

Plan de difusión

Siguiendo la línea de trabajo del grupo de años anteriores, los resultados del proyecto se difundirán a través de revistas de alto impacto según el JCR y congresos especializados. Se pretende publicar unos 12 artículos (aproximadamente 3 por año) en las revistas relevantes de optimización matemática, investigación operativa y campos de aplicación (ingeniería eléctrica, producción industrial), en donde los miembros del equipo ya han publicado con anterioridad, como *SIAM J. on Optimization*, *Mathematical Programming*, *Operations*

Research, European J. on Operational Research, Computational Optimization and Applications, Computers and Operations Research, Optimization Methods and Software, IEEE Transactions on Smart Grid, Journal on Environmental Management, etc.

Se prevé presentar unas 6 ponencias anuales (4 internacionales, 2 nacionales), en los congresos especializados más relevantes de optimización e investigación operativa, incluyendo los organizados por SIAM, MOS (ISMP e ICCOPT), INFORMS, IFORS, EURO y SEIO.

También se prevé difundir los resultados de los proyectos en seminarios y reuniones con empresas y entidades interesadas (tal y como hemos hecho en el pasado; por ejemplo, en 2018 dimos charlas sobre resultados de nuestra investigación en el National Statistics Center of Japan (Tokyo), y en Google New York). Finalmente, y en función de los recursos finales disponibles, se podría elaborar una web para difundir los resultados del proyecto.

Transferencia de resultados y explotación

La transferencia dependerá de los resultados finalmente obtenidos en el proyecto, y del interés último de las empresas. A priori, y por nuestra relación y proyectos de transferencia previos con empresas, consideramos que las posibles entidades interesadas podrían ser:

- Accenture Technology Labs (TechLabs, San José, California, USA), división de desarrollos avanzados de Accenture S.L. interesada en los problemas de diseño estratégico de cadena de suministro. Nuestro grupo participa en la actualidad en el segundo proyecto de investigación con esta empresa. TechLabs está colaborando en la definición de los problemas de diseño estratégico de cadena de suministro desde el punto de vista de sus clientes, pertenecientes a diversos sectores de actividad industrial. Esta visión global es necesaria de cara a la definición de modelos de diseño estratégico de cadena de suministro lo más genéricos posibles, capaces de adaptarse a las necesidades del mayor número posible de empresas de manufactura. TechLabs será la encargada de proporcionar los datos que alimentarán los modelos de cadena de suministro del proyecto.
- La investigación en métodos de protección de datos puede ser explotada en institutos de estadística europeos, con los que hemos colaborado en varios proyectos previos (dos proyectos europeos FP5 y FP7, y 7 convenios con Statistics Netherlands, Statistics Germany y Eurostat). En proyectos previos del plan estatal de I+D varios institutos de estadística actuaron como EPOs (entre ellos, los institutos de estadística de Alemania, Catalunya, Finlandia, Holanda, Italia). En el momento de elaborar este documento estamos en negociación con el European Central Bank para un convenio que implica la protección de tablas de datos de gran tamaño (cientos de millones de datos).
- Naturgy (anteriormente Gas Natural Fenosa Renovables S.L.U.) viene participando desde el año 2003 en los sucesivos proyectos del Plan Nacional dedicados a optimización de modelos de mercado eléctrico desarrollados por nuestro (DPI2002-03330, DPI2005-09117-C02-01, DPI2008-02153 y MTM2013-48462-C2-1-R), y continúa mostrando su interés en participar en el presente proyecto. Esta compañía posee una cartera de tecnologías de generación que combina tanto las unidades de generación térmicas y parques eólicos, por lo que, al igual que ocurría con Accenture, es ideal para asesorar sobre la validez de los modelos matemáticos que se desarrollarán para el problema de integración de energía renovables, tal como ha estado haciendo hasta ahora. Naturgy continuará garantizando los datos reales de generación eólica necesarios para la definición de los casos de estudio a resolver en los diferentes apartados de este proyecto.
- El algoritmo de punto interior y paquete BlockIP son la mejor técnica de optimización para clases de problemas masivos (miles de millones de variables), y por este motivo podría ser del interés de empresas que gestionen grandes volúmenes de datos. Por ejemplo, Google New York nos invitó a dar una charla sobre BlockIP en agosto de 2018. Sin embargo, a día de hoy, no hay de momento previsión de ningún tipo de colaboración que implique transferencia.

3. CAPACIDAD FORMATIVA - *TRAINING CAPACITY*

Plan de formación previsto

- El equipo cuenta con cuatro doctorandos que forman parte del equipo de trabajo, y se prevé finalicen su tesis doctoral durante el proyecto: (1) Paula Lama, becada por CONACyT (México) está aplicando el método de punto interior especializado de BlockIP a la solución de problemas estocásticos de gran escala; (2) Marlyn Cuadrado, becaria FPI, está trabajando en métodos de generación de escenarios para modelos de generación eléctrica con renovables y acaba de finalizar una estancia en la Universidad de Campinas en el grupo del profesor Marcos Julio Rider; (3) Daniel Ramon Lumbierres está becado por Accenture TechLabs (California, USA) y está desarrollando modelos de supply chain (4) Carlos Antonio Becerril, becario CONACyT (México) se prevé que aplique métodos de punto interior (BlockIP) a la solución de problemas de mercados de electricidad. Consideramos incorporar nuevos doctorandos que financiaríamos mediante programas de becas internas de la UPC, de la Generalitat de Catalunya, del programa FPI, y del programa MSCA del H2020 (en el cual presentaremos una solicitud). En particular, solicitamos la inclusión del proyecto en el programa FPI con un contrato predoctoral.
- Los doctorandos del punto anterior (actuales y futuros) desarrollan su tesis en el Programa de Doctorado en Estadística en Investigación Operativa de la UPC, del cual el investigador principal 1 del proyecto es coordinador desde septiembre de 2010. Este programa obtuvo en 2011 la Mención hacia la Excelencia MEE2011-0384 para los años 2011-2013 (los años anteriores ya contaba con la Mención de Calidad, y no ha salido todavía la convocatoria para los posteriores). El Departamento y la UPC dedican recursos propios a la formación de los estudiantes de doctorado.
- La formación de los doctorandos del Programa de Doctorado en Estadística e Investigación Operativa se realiza principalmente a través de las asignaturas del Master Interuniversitario en Estadística e Investigación Operativa de la Facultad de Matemáticas y Estadística de la UPC, del cual el investigador principal 1 del proyecto es coordinador desde diciembre de 2017 (y aproximadamente lo será hasta la primavera de 2019). Los investigadores principales 1 y 2 del proyecto imparten la mayoría de los créditos de Investigación Operativa de dicho master; en particular, participan en los siguientes cursos: Optimización Continua, Optimización Estocástica, Optimización de Gran Escala, Optimización en Ciencia de Datos, y Optimización en Mercados Eléctricos.
- Excepto Paula Lama, Marlyn Cuadrado, Daniel Ramon Lumbierres y Carlos Antonio Becerril (4 doctorandos del equipo de trabajo) y Josep Anton Sánchez (miembro a dedicación compartida del equipo de investigación), el resto de miembros del equipo de investigación y equipo de trabajo son doctores. Y se espera que los cuatro doctorandos finalicen su tesis doctoral durante el proyecto.
- Los miembros del grupo de investigación han supervisado más de 50 tesis de Master/Licenciatura en la Facultad de Matemáticas y Estadística y en la Facultad de Informática de la UPC.

Relación de tesis realizadas o en curso

En los últimos 10 años el equipo de investigación ha dirigido o está dirigiendo nueve tesis doctorales (seis de ellas corresponden a miembros del equipo de trabajo) de temática relacionada con el proyecto:

- Jordi Cuesta Andrea, Contribucions als algorismes de punt interior basats en mètodes iteratius per a sistemes d'equacions, Doctorado en Estadística e Investigación Operativa, UPC, 29/9/2009.
- Cristina Corchero, Short-term bidding strategies for a generation company in the Iberian electricity market, Doctorado en Estadística e Investigación Operativa, UPC, 2/2/2011.
- Stefano Nasini, Mathematical programming based approaches for classes of complex

network problems Economical and sociological applications, Doctorado en Estadística e Investigación Operativa, UPC, 29/01/2015

- Daniel Baena, Exact and heuristic methods for controlled tabular adjustment, Doctorado en Estadística e Investigación Operativa, UPC, 3/7/2017.
- Glòria Casanellas, Optimization methods for the design of progressive lenses, Doctorado en Estadística e Investigación Operativa, UPC. Doctorado Industrial. Lectura prevista para 2019.
- Paula Lama, Solving large-scale stochastic optimization problems by specialized interior-point method, UPC. Lectura prevista para 2019-20.
- Marlyn Cuadrado, Scenario tree generation for multistage stochastic programming problems in electricity market problems, UPC. Lectura prevista para 2019-20.
- Daniel Ramon Lumbierres, Strategic models in supply chain design through multistage stochastic programming, UPC. Lectura prevista para 2020-21.
- Carlos Antonio Becerril, Efficient optimization techniques for the optimal multimarket electricity bid problem of a wind-thermal power producer, UPC. Lectura prevista para 2021-22.

Desarrollo científico o profesional de los doctores egresados

El grupo ha participado y participa en otros proyectos nacionales e internacionales (tanto competitivos como contratos). Mantiene contacto permanente con otros grupos de investigación, entidades y empresas, lo que beneficia la formación de sus doctorandos, les expone a problemas reales, y facilita su inserción laboral. En particular:

- César Beltrán, que finalizó su doctorado en 2001, es profesor titular de universidad del área de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad Rey Juan Carlos.
- Dulce Rosas se incorporó al Centro de Innovación del Transporte (Barcelona), tras finalizar su doctorado sobre el Traffic Assignment Problem en 2003.
- El ex-doctorando del equipo Adebayo Alabi, cuyo tema de tesis era la planificación de refinerías, se incorporó a la empresa petrolera Merpro (Escocia) en 2009.
- Jordi Cuesta se incorporó como profesor asociado a tiempo parcial de la Universitat Rovira i Virgili tras finalizar su doctorado en 2009.
- Cristina Corchero, que finalizó su doctorado en febrero de 2011, es jefe de proyecto en el IREC (Institut de Recerca en Energia de Catalunya).
- Stefano Nasini, que finalizó su doctorado en enero de 2015, es Assistant Professor en el IESEG de la Université de Lille (France).
- Daniel Baena, que finalizó su doctorado en julio de 2017, trabaja en Transports Metropolitans de Barcelona, y previamente lo hizo en el Institut d'Estadística de Catalunya en el tema de su tesis doctoral (protección de datos estadísticos).
- La actual doctoranda Gloria Casanellas trabaja en la empresa INDO, y está realizando un doctorado industrial (UPC-INDO) para la optimización de superficies de lentes progresivas.
- El actual doctorando Daniel Ramon Lumbierres está becado por Accenture TechLabs (California, USA), solucionando un problema planteado por dicha compañía (similar a un doctorado industrial).

4. IMPLICACIONES ÉTICAS Y/O DE BIOSEGURIDAD - *ETHICAL AND/OR BIOSAFETY IMPLICATIONS*

No aplica.