

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

DATOS INFORMATIVOS

Proyecto Interno Proyecto Semilla Proyecto Junior Proyecto Multi e Interdisciplinario

Título del proyecto:

Técnicas de paralelización y algoritmos de plano cortante para el cálculo de horarios de clase

Investigación básica Investigación aplicada Investigación pedagógica Innovación

DEPARTAMENTO(S):

1. Departamento de Matemática
- 2.

LÍNEA(S) DE INVESTIGACIÓN (verificable en el SAEW):

1. Optimización Matemática y Control
- 2.

Resumen de información del director y colaboradores del proyecto

Director

| Apellidos y nombres | Departamento | Título de mayor nivel(Ing., M.Sc., Ph.D) |
|--------------------------------|--------------|--|
| TORRES CARVAJAL LUIS MIGUEL | MATEMÁTICA | PhD en Matemática Aplicada |

Colaborador(es)

| Apellidos y nombres | Departamento | Título de mayor nivel Ing., M.Sc., Ph.D) |
|----------------------------------|--------------|--|
| TORRES GORDILLO RAMIRO DANIEL | MATEMÁTICA | PhD en Matemática Aplicada |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |



HOJA DE VIDA DEL DIRECTOR DEL PROYECTO

Datos personales

| | | | | |
|---|---------------------|-----------------------|----------------------------------|--|
| TORRES CARVAJAL | | LUIS MIGUEL | | |
| Apellidos | | Nombres | | |
| M: (X) F: (.) | 28/02/1973 | Ecuatoriano | luis.torres@epn.edu.ec | |
| Sexo | Fecha de nacimiento | Nacionalidad | Correo institucional | |
| Extensión EPN: 1535 | | Celular: 099 980 2869 | Teléfono del domicilio: 322 6787 | |
| Cédula de identidad: 171212164-7 | | | | |
| Dirección particular / ciudad: MALLORCA N24-500 Y FRANCISCO SALAZAR | | | | |
| Facultad: Ciencias | | | | |
| Departamento: Matemática | | | | |
| Cargo actual en la EPN (tal como aparece en el nombramiento): Profesor Principal a Tiempo Completo | | | | |

Educación universitaria. Proveer el nombre de los títulos de pregrado y postgrado (Ing., Magister, Ph.D.)

| Título | Año | Institución/Universidad | Ciudad/País | Área de investigación de la tesis |
|----------------------|------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Ingeniero Maetmático | 1998 | Escuela Politécnica Nacional | Quito / Ecuador | Matemática Aplicada |
| Dr. rer. nat. | 2003 | Universidad Técnica de Berlín | Berlín / Alemania | Matemática Aplicada |

Experiencia investigativa y en ejecución de proyectos (cite los tres más relevantes)

| Año | Título del proyecto | Cargo /Actividades realizadas |
|-------------|--|-------------------------------|
| 2013-2015 | Modelos de programación entera para la planificación automatizada de horarios de clase | Director |
| 2013 - 2015 | Desarrollo e implementación de modelos matemáticos de optimización para el corredor central del sistema Metrobús-Q | Director |
| 2015 - 2016 | Packing vs. Covering: Structural Aspects (Proyecto en el marco del programa de cooperación regional MATH-AmSud) | Coordinador para Ecuador |

Publicaciones, patentes, prototipos o productos (cite las cinco más relevantes o las más recientes)

- Torres L. M. (2015) "*Minor related row family inequalities for the set covering polyhedron of circulant matrices*". Electronic Notes in Discrete Mathematics. Vol. 50. pp. 325 - 330, Elsevier.
- Torres L. M. & Wagler A. (2013) "*Analyzing the dynamics of deterministic systems from a hypergraph theoretical point of view*". RAIRO - Operations Research. Vol. 47(3). pp. 321 - 330, Cambridge University Press.
- Borndörfer R., Pfetsch M., Torres L. M. & Torres R. (2011) "*Line Planning on Tree Networks with Applications to the Quito Trolebús System*". International Transactions in Operational Research. Vol. 18(4). pp. 455 - 472, Wiley.
- Torres L. M. & Wagler A. (2011) "*Encoding the dynamics of deterministic systems*". Math. Methods of Operations Research. Vol. 73(3). pp. 281 - 300, Springer.
- Holm E., Torres L. M. & Wagler A. (2010) "*On the Chvátal-rank of linear relaxations of the stable set polytope*". International Transactions in Operational Research. Vol. 17(6). pp. 827 - 849, Wiley.



Experiencia profesional , otros trabajos científicos y técnicos

Distinciones académicas

- Becario del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) durante la realización del doctorado.
- Miembro activo de la Academia de Ciencias del Ecuador.

Estadías postdoctorales

Mar 2005 : Estadía de investigación de dos meses en la Universidad Otto-von-Guericke en Magdeburg, Alemania.
2008–2010 : Postdoctorado en el Instituto de Optimización Matemática de la Universidad Otto-von-Guericke en Magdeburg, Alemania.

Conferencias y talleres

Conferencista plenario invitado

- 2nd Latin American Workshop on Optimization and Control (LAWOC 2010): “*Modeling the dynamic behavior of discrete deterministic systems*”. Julio 20 – 22, 2010. Rosario, Argentina
- 6th International Workshop on Biological Processes & Petri Nets (BioPPN 2015): “*A compact modeling approach for deterministic biological systems*”. Junio 22, 2015, Bruselas, Bélgica

Ponencias presentadas (últimos 5 años)

- VI Latin-American Algorithms, Graphs and Optimization Symposium - LAGOS 2011: “*On the Chvátal-rank of Relaxations of the Stable Set Polytope*”. Marzo 28 – Abril 1, 2011. Bariloche, Argentina
- XIII Encuentro de Matemática y sus Aplicaciones: “*Recubrimiento de conjuntos: Formulaciones, resultados y aplicaciones*”. Julio 30 – Agosto 3, 2012. Quito, Ecuador
- International Symposium on Mathematical Programming: “*On the first Chvátal-closure of the set covering polyhedron of circulant matrices*”. Agosto 19 – 24, 2012. Berlín, Alemania
- VII Latin-American Algorithms, Graphs and Optimization Symposium - LAGOS 2013: “*On the first Chvátal-closure of the fractional set covering polyhedron of circulant matrices*”. Abril 22 – 26, 2013. Playa del Carmen, México
- VI Seminario de la Red Latinoamericana en Optimización Discreta y Grafos: “*Acerca de la primera clausura de Chvátal del poliedro de recubrimientos asociado a matrices circulantes*”. Diciembre 2 – 3, 2013. Buenos Aires, Argentina
- 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies – IFORS 2014: “*A Multi-Depot Vehicle Scheduling Problem in a Public Transportation System in Quito*”. Julio 13 – 18, 2014. Barcelona, España.
- VIII ALIO/EURO Workshop on Applied Combinatorial Optimization – ALIO/EURO 2014: “*An Integer Programming Model for Scheduling Classes at the EPN-Quito*”. Diciembre 8 – 10, 2014. Montevideo, Uruguay.
- VIII Latin-American Algorithms, Graphs, and Optimization Symposium – LAGOS 2015: “*Minor related row family inequalities for the set covering polyhedron of circulant matrices*”. Mayo, 11 – 15, 2015. Beberibe, Brasil.

Comités Organizadores

- X Encuentro de Matemática y sus Aplicaciones. Julio 24 – 28, 2006. Quito, Ecuador
- First Latin American Workshop on Optimization and Control. Julio 7– 9, 2008. Quito, Ecuador
- Escuela de Matemática de Latinoamérica y el Caribe, EMALCA. Octubre 18 – 30, 2010. Quito, Ecuador
- XI Edición de las Olimpiadas de Matemática de la SEdeM. Abril –Junio, 2014, Ecuador
- XIX Escuela Latinoamericana de Verano de Investigación Operativa . Febrero 23 – 27, 2015. Quito, Ecuador.

Referee para revistas científicas

- Discrete Applied Mathematics
- Discrete Optimization
- Electronic Notes in Discrete Mathematics



- Mathematical Methods of Operations Research

Cargos administrativos

2010–2012 : Presidente de la Sociedad Ecuatoriana de Matemática (SEdeM)

2011–2013 : Subdecano de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional

2013 -2013 : Decano de la Facultad de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional

2013- actual : Coordinador del Área de Logística y Transporte – ModeMat

2014-actual: Coordinador del programa de Maestría en Optimización Matemática

Tesis dirigidas

Tesis de maestría y de grado

- Flores M. (2006). “Rutas más cortas al interior del Sistema de Transporte Masivo de Pasajeros de Guayaquil”. Maestría en Investigación de Operaciones. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Quishpe E. &Recalde G. (2006). “Metaheurística basada en Recocido Simulado para la construcción de árboles filogenéticos”. Ingeniería Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Soto M. (2007). “Algoritmos de optimización para un problema estocástico de flujo de caja”. Ingeniería Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Fernández J. (2008). “Modelos de optimización de portafolios: un estudio comparativo basado en simulaciones computacionales”. Ingeniería Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Pazmiño D. (2012). “Una perspectiva algebraica al problema de recubrimiento en matrices circulantes”. Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Montenegro M. (2012) “Indíces N y N+ para el polítopo de conjuntos estables asociado a ciertas familias de antiwebs”. Ingeniería Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Silva B. (2014) “Algoritmos de solución para una versión dinámica del problema de la mochila”. Ingeniería Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Heredia M.B. (2014) “Modelo de programación lineal entera para la generación de horarios de clase en la universidad”. Ingeniería Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Zúñiga E. (2015) "Algoritmo de generación de columnas para la asignación de tareas en el sistema Metrobús-Q" Ingeniería Matemática. Escuela Politécnica Nacional, Quito

Tesis doctorales

- Gutiérrez S. (2008). “Online and Approximation Algorithms for Practical Combinatorial Problems”. Programa Individual de Doctorado en Matemática Aplicada (codirector). Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Salazar F. (2009). “Unsplittable Flows with Bounded Congestion”. Programa Individual de Doctorado en Matemática Aplicada (codirector). Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Recalde D. (2009). “Approximating Real Life Hard Combinatorial Optimization Problems”. Programa Individual de Doctorado en Matemática Aplicada (codirector). Escuela Politécnica Nacional, Quito
- Torres R. (2009). “Line Planning on Tree Topologies”. Programa Individual de Doctorado en Matemática Aplicada (codirector). Escuela Politécnica Nacional, Quito



HOJA DE VIDA DEL PROFESOR COLABORADOR DEL PROYECTO (I)

Datos personales

| | | | | | |
|---|---------------------|--------------------|--------------------------------|--|--|
| TORRES GORDILLO | | | RAMIRO DANIEL | | |
| Apellidos | | | Nombres | | |
| M: (X) F: () | 11-10-1979 | ECUATORIANA | ramiro.torres@epn.edu.ec | | |
| Sexo | Fecha de nacimiento | Nacionalidad | Correo institucional | | |
| Extensión EPN:1580 | | Celular:0996897053 | Teléfono del domicilio:2231272 | | |
| Cédula de identidad: 1002563524 | | | | | |
| Dirección particular / ciudad: Solano E13-150 / Quito | | | | | |
| Facultad: CIENCIAS | | | | | |
| Departamento: MATEMATICA | | | | | |
| PROFESOR AGREGADO A TIEMPO COMPLETO (NIVEL 3, GRADO 5) | | | | | |
| Cargo actual en la EPN (tal como aparece en el nombramiento): | | | | | |

Educación Universitaria. Proveer el nombre de los títulos de pregrado y postgrado (Ing., Magister, Ph.D.)

| Títulos | Período | Institución/Universidad | Ciudad/País | Tema de tesis de grado |
|----------------------------|---------|---|-------------|--|
| Ingeniero Matemático | 2003 | Escuela Politécnica Nacional | Ecuador | Modelización estocástica del sistema integrado de trolebuses |
| Doctor en Matemática (PhD) | 2009 | Escuela Politécnica Nacional- TU Berlín | Ecuador | Line planning on tree topologies |

Experiencia investigativa y en ejecución de proyectos (cite los tres más relevantes)

| Período | Título del proyecto | Posición /Actividades realizadas |
|-----------|--|----------------------------------|
| 2010-2011 | Generación de calendarios deportivos para el Torneo Ecuatoriano de Fútbol usando Programación Entera | Colaborador/Investigación |
| 2011-2012 | Variante al problema de k-equicorte aplicada a un problema de zonificación óptima que aparece en la elaboración de calendarios deportivos. | Colaborador/Investigación |
| 2011-2013 | Modelos de Asignación de Flota y Conductores aplicados a la Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito (Senescyt) | Colaborador/ Investigación |
| | | |

Publicaciones, patentes, prototipos o productos (cite las cinco más relevantes o las más recientes)

1. D. Recalde, D. Severín, R. Torres and P.Vaca. Balanced Partition of a Graph for Football Team Realignment in Ecuador. Lecture Notes in Computer Sciences. accepted article to appear.
2. Recalde D., Torres R. and Vaca P. *Scheduling the professional Ecuadorian football league by integer programming*. Computers & Operations Research, Vol. 40(10), 2478-2484, Elsevier, 2013.
- 3.. Line planning on tree networks with applications to the Quito Trolebús system. Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer. International Transactions in Operacional Research. (2011) 1–18



4. Line Planning on Paths and Tree Networks with Applications to the Quito Trolebús System (Extended Abstract) Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer. In Proc. ATMOS 2008 - 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl Research Online Publication Server, 2008 DROPS Publication 1583 [ATMOS 2008 Proceedings].
5. Torres, Ramiro; Martínez, Fernanda. Diseño de circunscripciones electorales en el Ecuador. Investigación Operacional. Volume 35, Issue 1, 2014, Pages 17-26.

Experiencia profesional , otros trabajos científicos y técnicos

A bus scheduling model for a public transportation system in Quito. Luis M. Torres, Ramiro Torres, Miguel Flores, Raúl Pineda and Elizabeth Zuñiga Electronic Proceedings of VIII ALIO/EURO Workshop on Applied Combinatorial Optimization, December 2014, Montevideo (Uruguay).

On the Line Planning Problem in Tree Networks. Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer. "Electronic Proceedings of VI ALIO/EURO Workshop on Applied Combinatorial Optimization, December 2008, Buenos Aires (Argentina), ISBN 978-950-29-1116-8" also available as ZIB Report 08- 52

Line Planning on Paths and Tree Networks with Applications to the Quito Trolebús System. Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer, ZIB Report 08-35.

Line Planning on paths and trees .Luis M. Torres, Ramiro Torres, Marc Pfetsch and Ralf Borndörfer I Latin America Workshop on Optimization and Control. Escuela Politécnica Nacional – Universidad de Rosario-2008

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Proyecto Interno Proyecto Semilla Proyecto Junior X Proyecto Multi e Inter Disciplinario

Investigación Básica Investigación Aplicada X Investigación Pedagógica Innovación

DEPARTAMENTO(S):

1. Departamento de Matemática
- 2.

LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:

1. Optimización Matemática y Control
- 2.

1 Proyecto de Investigación

Título: Técnicas de paralelización y algoritmos de plano cortante para el cálculo de horarios de clase.

Resumen del proyecto (máximo 200 palabras)

La planificación de horarios de clase consiste en determinar horas, días de la semana y aulas para cada una de las actividades de docencia previstas por una unidad académica. Se trata de una tarea compleja, que debe considerar restricciones diversas como disponibilidad de profesores, cruces de horario, disponibilidad de infraestructura física, entre otras. El desarrollo de modelos para la planificación automatizada de horarios es un campo de investigación que ha registrado intensa actividad durante las últimas cuatro décadas.

En el marco del proyecto de investigación semilla PIS-12-49 se propusieron modelos de programación entera para la construcción de horarios de clase ajustados a las condiciones particulares de la Escuela Politécnica Nacional. Las heurísticas de solución propuestas han sido aplicadas con éxito en la Facultad de Ciencias. La investigación demostró también que existe margen considerable para la optimización en dos sentidos: por un lado, obtener cotas inferiores por el método de planos cortantes para evaluar las soluciones propuestas y, además, incorporar técnicas de paralelización en los algoritmos de solución, para aprovechar los recursos de computación de alto rendimiento actualmente disponibles. En el presente proyecto pretendemos abordar ambos problemas, además de considerar aspectos adicionales como la compacidad de los horarios calculados.

Palabras clave (4-6): planificación de horarios; programación entera; planos cortantes; computación en paralelo; investigación de operaciones



2 **Objetivos, relevancia, productos y resultados esperados de esta propuesta de investigación**

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

- Investigar el uso de técnicas de programación en paralelo y métodos de plano cortante para mejorar algoritmos de solución para el problema de planificación automatizada de horarios de clase.

2.1.2 Objetivos Específicos

- a. Investigar la aplicación de diferentes familias de planos cortantes para obtener cotas inferiores para el modelo.
- b. Desarrollar algoritmos basados en el paradigma de computación en paralelo para resolver un modelo de programación entera para la planificación automatizada de horarios de clase.
- c. Estudiar comparativamente el desempeño de métodos de solución basados en heurísticas primales versus métodos de solución basados en el paradigma de la programación lineal entera.
- d. Extender el modelo de programación entera para incorporar restricciones que garanticen la capacidad del horario para profesores, así como para estudiantes de un mismo nivel.

2.2 Detalle de los resultados esperados (con relación a los objetivos)

- a. Publicación científica con la descripción de los nuevos planos cortantes propuestos y el análisis de su desempeño en el algoritmo de solución.
- b. Implementación de una herramienta informática con versiones paralelizadas de los algoritmos actualmente en uso para la solución del modelo, la misma que será puesta a disposición de las unidades académicas de la Escuela Politécnica Nacional (EPN).
- c. Publicación científica con los resultados de la comparación computacional entre los métodos basados en heurísticas primales y los métodos basados en la programación entera, realizada sobre instancias reales concernientes a la planificación académica en la EPN.
- d. Reporte técnico y presentación de una ponencia con el nuevo modelo de programación entera propuesto para incorporar las restricciones de capacidad.



| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|----------------------------|---|---|--------------------------|--|---|------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| 3 | Relevancia de la propuesta de investigación y su relación con la(s) líneas de investigación | | | | | | | | | | | | | | |
| | <p>El desarrollo de modelos de optimización y métodos computacionales para la planificación automatizada de horarios de clase constituye un campo de investigación que ha recibido mucha atención durante las últimas cuatro décadas y que aún registra intensa actividad en la actualidad, como puede verificarse en el gran número de publicaciones académicas recientes. La presente propuesta de investigación está enfocada hacia profundizar los resultados obtenidos en el proyecto semilla PIS-12-49, en el que se propuso un modelo de programación lineal entera para el cálculo de horarios de clase ajustados al contexto de la Escuela Politécnica Nacional y se desarrolló una herramienta informática para implementarlos.</p> <p>Con el presente trabajo se busca investigar dos estrategias para mejorar los algoritmos de solución planteados en el proyecto semilla, las mismas que están enmarcadas dentro de la línea de investigación de <i>Optimización Matemática y Control</i> del Departamento de Matemática:</p> <ul style="list-style-type: none">• el empleo de métodos de planos cortantes para producir cotas más fuertes para el valor del óptimo del problema, las mismas que a su vez pueden ser aprovechadas en algoritmos eficientes de solución; y,• la incorporación de técnicas de computación en paralelo dentro de los algoritmos de solución, para permitir el mejor aprovechamiento de los recursos de cómputo disponibles, lo que redundará en el cálculo de mejores soluciones. <p>Además de la relevancia teórica de los dos aspectos señalados, esta propuesta de investigación persigue alcanzar un impacto práctico, al mejorar una herramienta que será útil para la planificación de horarios de clase en las distintas unidades académicas de la EPN, y que puede luego ser aplicada en otras universidades y escuelas politécnicas.</p> | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Productos esperados | | | | | | | | | | | | | | |
| | <table><tr><td>a. Publicaciones científicas (obligatorio);</td><td>X</td></tr><tr><td>b. Disertación a la Comunidad Politécnica;</td><td>X</td></tr><tr><td>c. Proyecto de Titulación;</td><td>X</td></tr><tr><td>d. Tesis de Grado (maestría o doctorado);</td><td><input type="checkbox"/></td></tr><tr><td>e. Aplicación tecnológica construida o implementada;</td><td>X</td></tr><tr><td>f. Patente presentada;</td><td><input type="checkbox"/></td></tr><tr><td>g. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación.</td><td><input type="checkbox"/></td></tr></table> | a. Publicaciones científicas (obligatorio); | X | b. Disertación a la Comunidad Politécnica; | X | c. Proyecto de Titulación; | X | d. Tesis de Grado (maestría o doctorado); | <input type="checkbox"/> | e. Aplicación tecnológica construida o implementada; | X | f. Patente presentada; | <input type="checkbox"/> | g. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación. | <input type="checkbox"/> |
| a. Publicaciones científicas (obligatorio); | X | | | | | | | | | | | | | | |
| b. Disertación a la Comunidad Politécnica; | X | | | | | | | | | | | | | | |
| c. Proyecto de Titulación; | X | | | | | | | | | | | | | | |
| d. Tesis de Grado (maestría o doctorado); | <input type="checkbox"/> | | | | | | | | | | | | | | |
| e. Aplicación tecnológica construida o implementada; | X | | | | | | | | | | | | | | |
| f. Patente presentada; | <input type="checkbox"/> | | | | | | | | | | | | | | |
| g. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación. | <input type="checkbox"/> | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Descripción y metodología y diseño del proyecto | | | | | | | | | | | | | | |



5.1 Descripción, metodología y diseño del proyecto (Máximo dos carillas)

El problema de planificación de horarios de clase consiste en calendarizar las actividades de docencia previstas por una unidad académica dentro de un período determinado, es decir, asignar para el desarrollo de cada una de las sesiones de clases una hora, un día de la semana y un aula o laboratorio. Esta tarea puede llegar a ser bastante compleja, pues deben tomarse en cuenta restricciones de diversa índole, tales como respetar la disponibilidad de tiempo de los profesores, evitar cruces de horario para profesores y alumnos, considerar las limitaciones de recursos en cuanto a infraestructura física disponible, respetar la capacidad de las aulas y laboratorios, procurar una cierta compacidad en los horarios de alumnos y profesores, entre otras. Como consecuencia, la construcción manual de horarios de clase es una actividad que suele consumir bastante tiempo y con un alto riesgo de incurrir en errores. El desarrollo de modelos para la planificación automatizada de horarios es un campo de investigación que ha registrado intensa actividad durante las últimas cuatro décadas. Numerosos modelos han sido propuestos para distintas variantes del problema, las cuales generalmente son clasificadas en tres categorías: planificación de horarios para colegios, planificación de horarios para universidades y planificación de horarios de exámenes [18]. De manera similar, se han desarrollado diversos esquemas de solución, basados tanto en técnicas de Inteligencia Artificial (algoritmos genéticos y evolutivos [15], búsqueda tabú [12], redes neuronales [7], algoritmos híbridos [11], entre otros), así como en métodos de optimización matemática, específicamente en algoritmos basados en la programación lineal y entera [3, 10, 16] y en el coloramiento de grafos [4]. Revisiones exhaustivas de variantes del problema, modelos y métodos de solución pueden encontrarse en [6, 14, 18].

En el marco del proyecto de investigación semilla PIS-12-49 “*Métodos de programación entera para la planificación automatizada de horarios de clase*” fue propuesto un modelo para la construcción de horarios de clase ajustados a las condiciones particulares de la Escuela Politécnica Nacional. El modelo especifica las siguientes *restricciones fuertes* (aquellas que deben ser forzosamente cumplidas en el horario a calcular): evitar cruces entre cursos a cargo de un mismo profesor, evitar cruces entre cursos que corresponden a un mismo nivel referencial de la malla curricular, respetar los horarios de disponibilidad de los profesores, tomar en cuenta la disponibilidad de aulas y laboratorios, y respetar la capacidad de las aulas. Adicionalmente, el modelo incorpora algunas *restricciones débiles* (cuyo cumplimiento es deseable, pero no obligatorio): respetar la preferencia de horario de los profesores y evitar cruces entre cursos correspondientes a materias de niveles cercanos en la malla curricular. Las restricciones débiles se modelan por medio de una función objetivo, cuyo valor puede considerarse como una medida de la calidad del horario obtenido. El modelo es suficientemente flexible como para permitir abordar la planificación simultánea de horarios para varias carreras, contemplando la posibilidad de la existencia de cursos comunes entre las mismas. Para la solución del modelo se emplean dos algoritmos de tipo heurístico: una heurística de inserción secuencial que consiste en ordenar las sesiones aleatoriamente para luego proceder a programarlas “una tras otra” en los mejores períodos disponibles; y una heurística de mejora local que intenta reprogramar pares de sesiones en conflicto mientras esto produzca mejoras en la solución actual. El modelo de programación lineal entera, los algoritmos de solución y algunos resultados obtenidos en pruebas computacionales están reportados en [8]. La herramienta informática desarrollada como parte del proyecto se encuentra actualmente disponible para el uso por parte de las unidades académicas de la EPN.

Si bien las heurísticas de solución propuestas han sido aplicadas con éxito a instancias reales de la Facultad de Ciencias de la EPN, existe aún margen considerable para mejoras, al menos en dos aspectos que pretendemos abordar en el presente proyecto. Por un lado, es importante obtener cotas inferiores para el valor óptimo del problema. Una de las ventajas principales del empleo del paradigma de la programación lineal entera (frente al uso de algoritmos de tipo heurístico y meta-heurístico) es precisamente la posibilidad de obtener información que permita establecer *brechas de optimalidad*, es decir, estimar la cercanía (o lejanía) de la solución encontrada con respecto al óptimo del problema. Para ello, es necesario acotar el valor de la solución óptima, lo que generalmente se consigue al resolver una relajación del modelo propuesto. La relajación canónicamente empleada es la relajación lineal, obtenida al ignorar la condición de integralidad de las variables del modelo y resolver el programa lineal resultante. Sin embargo, para el modelo de planificación de horarios propuesto, la relajación lineal produce cotas muy débiles, posiblemente debido a la presencia de restricciones que linealizan relaciones de naturaleza cuadrática entre las variables de decisión. Una posibilidad para ajustar la relajación lineal y producir mejores cotas consiste en el empleo de planos cortantes: desigualdades válidas para el poliedro entero asociado al problema, pero que separan ciertas soluciones fraccionarias. En [17] los autores reportan



algunos resultados de la aplicación de algoritmos de planos cortantes a modelos de programación de horarios empleados en un caso de estudio en colegios brasileños. Estos algoritmos pueden además integrarse dentro de esquemas de solución tipo *branch-and-cut* para la búsqueda de soluciones exactas, como se reporta en [5]. Adicionalmente, el método puede combinarse con algoritmos de generación de columnas, los que pueden verse como algoritmos de planos cortantes aplicados al programa dual lineal. En [13] se investiga un método de generación de columnas en el contexto de la construcción de horarios para colegios en Grecia. Estudiaremos la aplicabilidad de los planos cortantes propuestos en estos trabajos al modelo de planificación de horarios de la EPN, y exploraremos la posibilidad de obtener nuevas familias de planos cortantes, explotando la relación existente entre el problema de planificación de horarios y el problema de coloramiento de grafos [4].

Otro aspecto importante que pretendemos abordar en el presente proyecto concierne a la incorporación de técnicas de paralelización en los algoritmos de solución, para aprovechar los recursos de computación de alto rendimiento actualmente disponibles. La computación en paralelo es una estrategia ampliamente utilizada hoy en día para la solución de problemas de alta complejidad en el cálculo científico a gran escala. En gran medida, esto se debe a la disponibilidad de tecnologías de bajo costo para el procesamiento en paralelo, las cuales incluso han llegado hasta el nivel de los computadores personales, a través de las nuevas generaciones de procesadores de múltiples núcleos (*multi-core processors*). En lo que respecta a la planificación de horarios, se han llevado adelante algunos trabajos previos en este sentido. Slechta [19] propone una técnica para descomponer el problema de calendarización de horarios para colegios en varios subproblemas, que el autor denomina “problemas de planificación de horarios multirecurso”. Estos subproblemas son posteriormente resueltos en paralelo por procesadores independientes. Por otra parte, Kingston [9] presenta un método jerárquico que consiste en la combinación de recursiva de soluciones parciales al problema hasta conseguir el horario de clases completo. Finalmente, Srdic et al. [20] estudian el impacto de paralelizar un algoritmo genético para el cálculo de horarios de clases en escuelas. Pillay [14] identifica al procesamiento en paralelo como una de las tecnologías que deben ser investigadas con profundidad en el futuro para el desarrollo de nuevos métodos de solución al problema de planificación de horarios. En nuestro caso, proponemos paralelizar la heurística de inserción secuencial para poder considerar una mayor cantidad de alternativas al momento construir la solución inicial. Investigaremos además varias posibilidades de paralelizar la heurística de mejora local para permitir una exploración más exhaustiva del espacio de búsqueda. Finalmente, estudiaremos la aplicabilidad de algunas técnicas de descomposición para dividir el modelo de programación entera en submodelos más simples, que puedan ser resueltos en paralelo. Aprovecharemos los recursos de computación en paralelo disponibles en el Laboratorio Nacional de Cálculo Científico, que es administrado por el Centro de Modelización Matemática.

Como un tercer objetivo del proyecto, pretendemos comparar el desempeño de los métodos exactos (aquellos basados en algoritmos de programación entera) frente a los métodos heurísticos para la solución de las instancias del problema de planificación de horarios que se presentan en el entorno de la EPN. Los métodos exactos resultaron inaplicables en el marco del proyecto semilla PIS-12-49, principalmente debido a la ausencia de cotas inferiores fuertes para el valor de la solución óptima. Esperamos que esta situación cambie con los nuevos resultados a obtener en la primera parte del presente proyecto, en cuyo caso sería interesante poder realizar estudios comparativos entre estas dos familias de métodos.

Finalmente, un último objetivo del proyecto consiste en investigar posibles extensiones al modelo actualmente propuesto, para incorporar nuevas restricciones. Luego de las primeras aplicaciones del algoritmo, realizadas en el contexto del cálculo de horarios de clase para la Facultad de Ciencias de la EPN, se han recibido algunos comentarios y sugerencias. En particular, se observó que los horarios calculados tienden a ser “dispersos”; es decir, el horario de un profesor puede tener clases en horas muy distintas y con la presencia de muchas “horas huecas”. Lo mismo ocurre para las materias pertenecientes a un mismo nivel de la malla curricular. Esto se debe a que el modelo actual tiene por objetivo disminuir la mayor cantidad de cruces posible, aprovechando para ello todos los recursos disponibles (tanto en tiempo como en espacio). Una nueva variante del modelo podría incluir en la función objetivo una componente adicional para medir la compacidad del horario a calcular. Modelos para planificación de horarios que incorporan restricciones similares han sido propuestos, por ejemplo, por Alvarez-Valdes et al. [1] y Birbas et al. [2].



Referencias bibliográficas

1. Alvarez-Valdes R., Martin G., & Tamarit J. M. (1996). Constructing good solutions for the Spanish school timetabling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 47(10), 1203–1215.
2. Birbas T., Daskalaki S., & Housos E. (2009). School timetabling for quality student and teacher schedules. *Journal of Scheduling*, 12(2), 177–197.
3. Boland N., Hughes B. D., Merlot L. T. G., & Stuckey P. J. (2008). New integer linear programming for course timetabling. *Computers and Operations Research*, 35, 2209–2233.
4. Burke E. K., de Wera D., & Kingston J. F. (2004). *Applications of timetabling*. En Handbook of graph theory (pp. 445–474). Londres, Gran Bretaña: Chapman & Hall.
5. Burke E. K., Marecek J., Parkes A. J., & Rudová H. (2012). A branch-and-cut procedure for the Udine Course Timetabling problem. *Annals of Operations Research*, 194, 71–87. Doi: 10.1007/s10479-010-0828-5.
6. Burke E. K., & Petrovic S. (2002). Recent research directions in automated timetabling. *European Journal of Operational Research*, 140, 266–280.
7. Carrasco M. P., & Pato M. V. (2004). A comparison of discrete and continuous neural network approaches to solve the class/teacher timetabling problem. *European Journal of Operational Research*, 153, 65–79.
8. Heredia M. B., & Torres L. M. (2014). An integer programming model for scheduling classes at the Escuela Politécnica Nacional in Quito. *VIII Workshop on Applied Combinatorial Optimization ALIO/EURO 2014*. Montevideo, Uruguay.
9. Kingston J. H. (2007). Hierarchical timetable construction. *Lecture Notes in Computer Science*, 3867, 294–307.
10. Lach, G. & Lübbecke, M. E. (2012). Curriculum based course timetabling: new solutions to Udine benchmark instances. *Annals of Operations Research*, 194, 255–272. Doi: 10.1007/s10479-010-0700-7.
11. Liu Y., Zhang D., & Leung S. C. H. (2009). A simulated annealing algorithm with a new neighbourhood structure for the timetabling problem. *First ACM/SIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation* (pp. 381–386).
12. Minh K. N. T. T., Thanh N. D. T., Trang K. T., & Hue N. T. T. (2010). Using tabu search for solving a high school timetabling problem. *Studies in Computational Intelligence*, 283, 305–313.
13. Papoutsis, K., Valouxis, C., & Housos, E. (2003). A column generation approach for the timetabling problem of Greek high schools. *Journal of Operational Research Society*, 54(3), 230–238.
14. Pillay, N. (2013). A survey of school timetabling research. *Annals of Operations Research*. Doi: 10.1007/s10479-013-1321-8.
15. Raghavjee R., & Pillay N. (2010). Using genetic algorithms to solve the South African school timetabling problem. *World congress on nature and biologically inspired computing (NaBIC'10)*. New York, EEUU: IEEE Press.
16. Ribic, S., & Konjicija, S. (2010). A two phase integer programming approach to solving the school timetabling problem. *International conference on information technology interfaces (ITI)* (pp. 651–656).
17. Santos H. G., Uchoa E., Ochi L. S., & Maculan N. (2012). Strong bounds with cut and column generation for class-teacher timetabling. *Annals of Operations Research*, 194, 399–412. Doi: 10.1007/s10479-010-0709-y.
18. Schaerf, A. (1999). A survey of automated timetabling. *Artificial Intelligence Review*, 13(2), 87–127.
19. Slechta, P. (2005). Decomposition and parallelization of multi-resource timetabling problem. *Lecture Notes in Computer Science*, 3616, 177–189.
20. Srndic N., Dervisevic M., Pandzo E., & Konjicija S. (2009). The application of a parallel genetic algorithm to timetabling of elementary school classes: a coarse grained approach. *22nd International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies ICAT 2009* (pp. 1–5). New York, EEUU: IEEE Press.



6 Tiempo de dedicación de docentes, infraestructura, equipos y fondos adicionales.

6.1 Tiempo máximo de dedicación semestral del Director del proyecto, de los docentes participantes y otros colaboradores.

El tiempo de dedicación máximo será de acuerdo al tipo de proyecto:

| <i>Proyecto</i> | <i>Director</i> | <i>Colaboradores</i> |
|-------------------|-----------------|----------------------|
| <i>PII y PIS</i> | <i>16 HSS</i> | <i>8 HSS</i> |
| <i>PIJ y PIMI</i> | <i>20 HSS</i> | <i>10 HSS</i> |

| Nombre | Rol (director o colaborador) | Horas de dedicación | Departamento |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------|
| Dr. Luis Miguel Torres | Director | 15 | Matemática |
| Dr. Ramiro Torres | Colaborador | 10 | Matemática |
| | | | |
| | | | |

6.2 Infraestructura y equipos

Para el presente proyecto se utilizarán las instalaciones de cálculo en paralelo actualmente disponibles en el Laboratorio Nacional de Cálculo Científico. Al presente, este laboratorio comprende un sistema blade de servidores de alto rendimiento que abarca un total de 31 nodos de cómputo, conectados entre sí por una red Infiniband de alto rendimiento.

6.3 Breve justificación del equipo requerido

Se pretende adquirir un servidor blade para incorporarlo como un nuevo nodo de cómputo dentro del sistema, con la finalidad de asegurar recursos de cómputo exclusivamente dedicados al proyecto. De esta manera, se aprovecharán las otras facilidades ya instaladas en el laboratorio, como conexiones de red de alta velocidad, recursos de almacenamiento masivo, potencia eléctrica y refrigeración, entre otros.

Una vez finalizado el proyecto, la potencia adicional de cálculo instalada quedará disponible para futuros proyectos de investigación, así como para dar servicio a las unidades académicas de la EPN en lo que se refiere al cálculo de horarios.

6.4 Fondos Adicionales

7 Declaración del Director del Proyecto

Declaro que la presente propuesta es de mi autoría y de los colaboradores mencionados y que no ha sido presentada en ninguna convocatoria de otra institución pública o privada solicitando el financiamiento total del proyecto.

DIRECTOR DEL PROYECTO
 Nombre: Dr. Luis Miguel Torres
 CC: 171212164-7

Quito, 18 de julio de 2016
(lugar y fecha)

DECLARACIÓN DEL JEFE DE DEPARTAMENTO

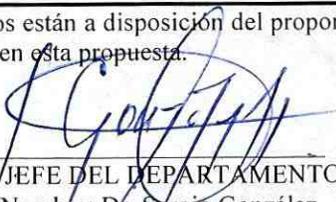
Esta propuesta ha sido aprobada por el Consejo del Departamento de Matemática, en sesión del día 18 de julio de 2016 mediante resolución No. 073. Las instalaciones, incluyendo personal, edificios, equipo y



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL
Dirección de Investigación y Proyección Social



recursos financieros están a disposición del proponente y sus colaboradores de acuerdo con las especificaciones que se encuentran en esta propuesta.


JEFE DEL DEPARTAMENTO
Nombre: Dr. Sergio González
CC: 170782493-2

Quito, 18 de julio de 2016
(lugar y fecha)

