

APLICACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA ASIGNACIÓN DE HORARIOS EN UNA INSTITUCIÓN EDUCATIVA MEXICANA

APPLICATION OF LINEAR PROGRAMMING FOR THE TIMETABLING MODEL IN TECHNICAL EDUCATION INSTITUTION IN MEXICO

Adriana Canseco-González¹, Diana Sánchez-Partida^{1,*}, Catya Zuñiga-Alcaraz², Elias Olivares-Benitez³

RESUMEN

Un problema recurrente en cada inicio de periodo escolar en las Instituciones Educativas (IEs) es la calendarización de horarios de los profesores para un conjunto de grupos y cursos. En este trabajo se pretende optimizar la asignación de cursos a grupos en un conjunto de periodos de tiempo con determinados requerimientos. Se aborda este problema dentro de un plantel de educación técnica media, en el cual se analizan tres grupos de la especialidad de Laboratorista químico ofertada por la institución. Se diseñó un modelo de programación matemática que fue resuelto mediante la técnica de ramificación y acotamiento disponible en un software comercial de optimización llamado LINGO® 10. Este caso real fue implementado en el ciclo 2013 – 2014 y validado con éxito al resolver en 4 segundos las actividades que realizarán los empleados dentro de una franja horaria de entre 5 a 7 horas. El enfoque planteado contribuye a agilizar la toma de decisiones del centro escolar al inicio del ciclo académico.

Palabras clave: Programación Lineal Entera, calendarización de horarios, Ramificación y Acotamiento, Optimización.

ABSTRACT

Diverse scheduling problems in education such as planning of lectures' or exams' timetables are among the most recurrent problems each begging of an academic period. Therefore, these areas have been gaining interest, the planning of the schedules of professors or exams for a set of groups and courses. The timetabling problem involves scheduling a number of resources, each consisting of class of students, a teacher, a subject and a room, to a fixed number of time slots. The problem of school timetabling is addressed for an institution of technical education, analyzing three groups of one specialty among those offered by the institution. A mathematical programming model using branch and bound technique was designed to solve the timetable problem for a Mexican Institution. The solutions obtained by this approximation were implemented in the 2013 - 2014 academic period. The proposed approach has proved very good results by helping the decision makers in the institution to solve the planning of courses at the beginning of the academic period.

Keywords: Integer Linear Programming, Timetabling Problem, Branch and Bound, Optimization

¹Centro Interdisciplinario de Posgrados, UPAEP, Puebla, México.

²Universidad Aeronáutica de Querétaro, Querétaro, México.

³Universidad Panamericana, Guadalajara, México.

*Autor de correspondencia: diana.sanchez@upaep.mx

INTRODUCCIÓN

Dentro de cualquier organización, determinar la cantidad de personal y los horarios en que estos laboran, es un aspecto que ha cobrado gran importancia en el área de la investigación operativa. Se ha detectado que la escasez de empleados puede significar que los servicios no se presten o se presten con baja calidad, entre otras situaciones. Por otro lado, el exceso de empleados en una empresa puede disminuir la fluidez con la que se trabaja y representar un costo elevado que repercutirá en las utilidades de la empresa. Una eficiente programación de horarios puede contribuir a que la organización asegure la disponibilidad adecuada de trabajadores, en el lugar y momento correcto, con un menor costo, para ofrecer el servicio correcto y cumplir con sus metas de producción o servicio.

En diversos estudios reportados en la literatura, el problema de asignación de personal a horarios de trabajo tiene diferentes nomenclaturas dependiendo de las particularidades del problema. De acuerdo con Carrasco (2007), la calendarización de horarios se refiere a *“la actividad de determinar la cantidad óptima de trabajadores que debe haber en los diferentes horarios de una empresa para satisfacer la demanda de personal, aumentando la productividad y reduciendo costos”*.

Otra terminología muy frecuentemente usada es *timetabling* y *scheduling*. Wren (1995), describió la programación de horarios (o *timetabling*) como *“el problema de asignar ciertos recursos a un número limitado de bloques horarios y lugares, sujeto a diversas restricciones, con la intención de satisfacer un conjunto de objetivos en el mayor grado posible”*. En su mismo trabajo, el término *scheduling* se define como *“la minimización de costos totales obtenidos de la suma de recursos utilizados, sujeto a restricciones”*. La diferencia radica en que el *timetabling* se enfoca a la programación de horarios directamente relacionada con recursos; mientras que *scheduling* a la reducción de costos mediante una programación de horarios eficiente.

Se puede encontrar otra terminología relacionada como: *Shift Scheduling*; *Shift Design Scheduling*; *Workforce Scheduling*; *Employee Timetabling*, *Labor Shift Scheduling*, *Staff Scheduling* y *Rostering*, que hacen una representación estructurada de la asignación de los trabajadores a los horarios disponibles en un periodo de tiempo (Abseher, 2013), (Aykin, 1996). Lo que valdría comentar que tienen en común, es la definición de *horario*, el cual es el periodo de tiempo donde tanto los recursos (como por ejemplo empleados, enfermeras o profesores) están interactuando. Generalmente, el horario se define por su hora de inicio y su duración.

La programación de horarios es considerado un problema NP-completo, ya que se hace imposible intentar obtener la mejor solución mediante el descubrimiento de todas las posibles soluciones para los casos en que el tamaño del problema exceda una cierta dimensión, normalmente bastante limitada (Bustos et al., 2014).

La programación de horarios en las Instituciones Educativas (IEs) es un reto periódico al que se enfrentan al inicio de cada ciclo escolar, periodo de exámenes y eventos especiales. En particular, en el nivel medio superior y superior, la programación de horarios de asignaturas cada periodo depende, entre otros factores, del currículo a impartir por plan de estudio, es decir, de proponer una disponibilidad de cierto perfil del docente en cierta franja horaria, asignado a aulas con características específicas. El problema de la programación de horarios de asignaturas es referido como calendarización de horarios.

De la definición de Wren (1995), el proceso de calendarización de horarios en Instituciones Educativas tiene por objeto asignar ciertos cursos o asignaturas (*recursos*) a un número limitado de *bloques horarios* y aulas disponibles (*lugares*), con la intención de satisfacer un conjunto particular de restricciones en el mayor grado posible. Las restricciones se clasifican en dos tipos: obligatorias y deseables. Las restricciones obligatorias pueden ser temporales (bloques horarios de descanso o exámenes) o espaciales (aulas destinadas a actividades especiales como laboratorios) que deben cumplirse ya que la violación de alguna origina un

horario no válido. Por otro lado, las restricciones deseables denotan preferencias del usuario o institución. Las restricciones son políticas flexibles, ya que consisten en un conjunto finito de variables, cada una de las cuales posee un dominio de valores, permitiendo que el tomador de decisiones elija que restricciones acotaran recursos y cuales satisfacen determinado problema (Arangú y Salido, 2014).

El proceso de calendarización de horarios en Instituciones Educativas es particular para cada institución debido a las distintas reglas operacionales que se manejan. En consecuencia, no existe un modelo que pueda cubrir todos los requerimientos de alguna institución, por lo tanto, el obligatorio diseñar un modelo que pueda satisfacer las necesidades de la institución analizada (Sánchez-Partida *et al.*, 2014).

Dentro de las técnicas más utilizadas para la solución del problema de calendarización se encuentran la programación matemática y las meta-heurísticas. Por ejemplo, Ojeda (2012) utilizó Programación Lineal Entera para asignar horarios en una empresa telefónica. También se ha utilizado la Programación Entera Mixta en Guédez (2011) para casos en donde se tienen que fijar distintos de objetivos, recursos, la elección y asignación de horarios adecuados para ejecutar planes de acción en producción. Sarmiento *et al.* (2012) utilizó Programación Lineal Entera para el diseño de horarios de clases para un programa de pregrado de una Universidad nacional, para optimizar la capacidad instalada y mejorar los tiempos de respuesta para el proceso de programación de aulas de clase. Otros métodos de solución usadas han sido las meta-heurísticas como la Búsqueda Tabú para asignar horarios en instituciones de educación superior (Restrepo *et al.*, 2011) y heurísticos específicos como el Answer Set Programming para resolver el problema de diseño de turnos, encontrando el mínimo de turnos y asignar el óptimo número de trabajadores (Abseher, 2013).

Ribic *et al.* (2010) proponen un modelo para la generación de calendarización de una escuela secundaria, utilizando la programación lineal entera de dos fases. Con el fin de reducir el tiempo de cálculo necesario, descomponiendo el problema para determinar el día y, a continuación, en la segunda fase, generar una programación diaria. Abdul (2012), trabajó con horarios de examen y se concentró en enfoques constructivos basados en estrategias de ordenación para colorear grafos. La atención se centra en la calendarización de horarios mediante una estrategia de ordenación. Moreno *et al.* (2007), utilizaron la técnica de enfriamiento lento para la resolución del problema de calendarización de horarios, concluyendo que la aplicación de este tipo de técnica resultó relativamente sencilla de implementar y es aplicable de forma general a cualquier tipo de problema con una estructura combinatoria.

Cubillos *et al.* (2014), utilizaron los Algoritmos Genéticos (AG) para resolver el problema de calendarización de horarios. Los resultados comparan los AG con recocido simulado, Grasp y colonia de hormigas. Obteniendo que los resultados obtenidos con AG por la complejidad del problema son las más eficientes, gracias a su facilidad de uso y la diversidad de soluciones que puede generar. Por otra parte Cobas (2013) propone otra metodología de solución por la combinación de los algoritmos genéticos con una heurística de búsqueda. El rol del algoritmo genético es determinar la secuencia de todos los cursos a ser programados en un grupo, mientras que la heurística de búsqueda determina los intervalos de tiempo usados para programar los cursos. La metodología aplicada es considerada una prometedora forma de solución al problema de horarios, sin embargo una limitante importante fue identificada: la programación de clases paralelas no está permitida.

Nuestro estudio se basa en proponer un modelo de calendarización eficiente mediante el uso del método de Branch and Bound B&B (Ramificación y Acotamiento). Esta técnica se basa en un algoritmo diseñado para la resolución de modelos de Programación Entera. Su operatoria consiste en linealizar el modelo de Programación Entera, es decir, resolver éste como si fuese un modelo de Programación Lineal y luego generar cotas en caso que al menos una variable de decisión adopte un valor fraccionario. El algoritmo genera en forma recursiva cotas (o restricciones adicionales) que favorecen la obtención de valores enteros para las variables de decisión (Taha, 2012). En este contexto se pretende resolver el modelo lineal asociado

a un modelo de Programación Entera, que permita la optimización de recursos escolares como: cursos, grupos y horarios de una titulación universitaria a nivel medio superior.

El Centro Tecnológico Industrial y de Servicios # 104 (CETIS104), de la ciudad de Puebla, México se toma como caso de estudio particular en este trabajo. El CETIS104 imparte cinco especialidades: Turismo, Negocios, Laboratorista Químico, Dibujo Arquitectónico e Industrial, e Informática. Éste instituto ofrece diversas especialidades, de las cuales se ha seleccionado la especialidad de Laboratorista Químico turno matutino, para hacer la validación del modelo. Se ha tomado el plan de estudios del 5° Semestre, para elaborar la calendarización de horarios del ciclo escolar 2013-2014.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección “material y métodos” se describe la institución utilizada en el caso de estudio, así como el modelo matemático propuesto y su nomenclatura asociada. En dicha sección, se explica a profundidad las restricciones del problema así como su representación matemática. La sección de resultados presenta una solución factible al problema de calendarización en el cual se pueden destacar los beneficios obtenidos. Finalmente, se presenta la sección de conclusiones y trabajo futuro.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para poder planear una calendarización de horarios adecuada de los cursos semestrales, de las cinco especialidades, cada una con seis semestres de duración, se necesita actualmente de un grupo de personas dedicadas de tiempo completo. Se emplean entre 240-320 horas para la planeación de horarios para cada especialidad. Por lo que proponer una técnica sencilla que dé una calendarización eficiente al problema, es una aportación interesante a evaluar como herramienta.

Se ha desarrollado un modelo matemático que permite optimizar la calendarización de horarios de cursos a determinados profesores y aulas. Como se ha mencionado anteriormente, se ha tomado como caso de estudio la especialidad de Laboratorista Químico considerando únicamente el turno matutino correspondiente al 5° semestre del plan de estudios, para elaborar una calendarización de horarios de los cursos a impartir en el ciclo 2013-2014.

Para el 5° semestre de dicha especialidad, el total de cursos a cubrir del tronco básico se compone de 18 horas, y 10 horas del componente profesional. Se considera que los profesores están asignados a los cursos de acuerdo a su perfil profesional, pero podrían cubrir cursos tanto del tronco básico como del profesional. Los cursos ofertados en el primer semestre del ciclo 2013-2014 son: Ciencia y Tecnología, Inglés, Física, Probabilidad y Estadística, Componente Profesional 1 y 2, y Tutoría. Los cursos de Componente Profesional y Tutoría son propios de la especialidad técnica.

Los cursos se deben asignar a periodos permitidos, es decir, en una semana laboral de 5 días por semana. La asignación de los cursos se hace únicamente en el horario matutino, considerado un turno de 7 horas consecutivas de 7:00 a 14:00 horas. Se pueden formar a lo más 3 grupos para impartir el mismo curso. Los cursos de Componente Profesional 1 y 2, y Tutoría deben impartirse cierto número de horas en días específicos. No deben existir colisiones de horarios para profesores y cursos: cada profesor-curso puede recibir máximo una asignación para una sesión en una única aula. Se asume que un profesor está asignado a un solo curso.

En este trabajo se presenta un modelo de programación matemática para la calendarización de horarios para el caso de estudio descrito anteriormente con el uso de la técnica de ramificación y acotamiento.

Nomenclatura

Para definir el modelo, se necesita definir las variables y parámetros siguientes:

A : Conjunto de cursos ofertados, $A = \{1, \dots, AT\}$.

G : Conjunto de grupos abiertos, $G = \{1, \dots, GT\}$.

H : Conjunto de horarios disponibles en la semana, $H = \{1, \dots, HT\}$.

D : Conjunto de días lectivos, $D = \{1, \dots, DS\}$.

A_b : Subconjunto de los cursos del componente básico, $A_b \subseteq A$

A_p : Subconjunto de los cursos del componente profesional, $A_p \subseteq A$

H_d : Subconjunto de los horarios disponibles para un día d específico de la semana, $H_d \subseteq H$

H_{ad} : Subconjunto de los horarios en que se puede impartir el curso a en el día d , $H_{ad} \subseteq H$

AT : Número total de curso ofertados, $AT = 7$.

GT : Número total de grupos abiertos, $GT = 3$.

HT : Número total de horarios por semana, $HT = 35$.

DS : Número de días lectivos, $DS = 5$.

T_a : Número de horas requeridas por curso $a \in A$.

T_{ad} : Número de horas requeridas para cierto curso $a \in A$ en el día $d \in D$.

X_{agh} : $X_{agh} = 1$ si el curso $a \in A$, es asignado al grupo $g \in G$ en el horario $h \in H$. De otra forma $X_{agh} = 0$.

Las Tablas 1, 2 y 3 contienen la nomenclatura empleada en el modelo de programación matemática para resolver el problema descrito anteriormente. En la Tabla 1 se encuentra la lista de índices de los grupos analizados. La Tabla 2 muestra los horarios disponibles a través de los días de la semana. En la tabla 3, se definen los índices referentes a los cursos ofertados, así como el número de horas requeridas por grupo para dicho curso.

Tabla 1. Definición de variables referente a los grupos.

Nomenclatura	Definición
$g=1$	Grupo 1 del 5° semestre de Técnico Laborista Químico.
$g= 2$	Grupo 2 del 5° semestre de Técnico Laborista Químico.
$g= 3$	Grupo 3 del 5° semestre de Técnico Laborista Químico.

Tabla 2. Definición de variables referente a los horarios disponibles por semana (H).

Hora	Dias (D)				
	$d = 1$, Lunes	$d = 2$, Martes	$d = 3$, Miér- coles	$d = 4$, Jueves	$d = 5$, Vi- ernes
7.00-8.00	$h = 1$	$h = 8$	$h = 15$	$h = 22$	$h = 29$
8.00-9.00	$h = 2$	$h = 9$	$h = 16$	$h = 23$	$h = 30$
9.00-10.00	$h = 3$	$h = 10$	$h = 17$	$h = 24$	$h = 31$
10.00-11.00	$h = 4$	$h = 11$	$h = 18$	$h = 25$	$h = 32$
11.00- 12.00	$h = 5$	$h = 12$	$h = 19$	$h = 26$	$h = 33$
12.00-13.00	$h = 6$	$h = 13$	$h = 20$	$h = 27$	$h = 34$
13.00-14.00	$h = 7$	$h = 14$	$h = 21$	$h = 28$	$h = 35$

Tabla 3. Definición de variables referente a los cursos ofertados (A).

Nomenclatura	No. de horas requeridas T_a	Definición
$a \in A_b = 1$	5	Curso de Probabilidad y Estadística impartido por el profesor 1. Este es un curso del componente básico.
$a \in A_b = 2$	4	Curso de Física impartido por el profesor 2. Este es un curso del componente básico.
$a \in A_b = 3$	5	Curso de Inglés impartido por el profesor 3. Este es un curso del componente básico.
$a \in A_b = 4$	4	Curso de Ciencia y Tecnología impartido por el profesor 4. Este es un curso del componente básico.
$a \in A_p = 5$	4	Curso de Componente Profesional 1 impartido por el profesor 5. Este curso debe impartirse los días Martes y Jueves, con dos horas cada día. $T_{ad}=2, a = \{5\}, d = \{2, 4\}$
$a \in A_p = 6$	4	Curso de Componente Profesional 2 impartido por el profesor 6. Este curso debe impartirse los días Miércoles y Viernes, con dos horas cada día. $T_{ad} = 2, a = \{6\}, d = \{3, 5\}$
$a \in A_p = 7$	2	Curso de Tutoría impartido por el profesor 7. Este curso debe impartirse los días Lunes. $T_{ad} = 2, a = \{7\}, d = \{1\}$

Modelo matemático

En la forma de programación lineal se caracteriza por que hay un único objetivo que optimizar (minimizar o maximizar), existe un conjunto de variables de decisión que siempre son continuas y no negativas, todas sus restricciones son lineales y se tiene un conocimiento exacto de los parámetros y recursos utilizados en la restricción del modelo (Serra, 2004). La programación matemática es una técnica que ha ahorrado miles o millones de dólares a muchas compañías o negocios en los distintos países industrializados del mundo. Una proporción muy grande de los cálculos científicos en computadoras está dedicada al uso de la programación matemática (Hillier & Lieberman, 2001).

A continuación se presenta el modelo de programación entera, en las ecuaciones (1) – (6). La función objetivo busca maximizar la suma de las asignaciones de los cursos $a \in A$, a los grupos $g \in G$ en los horarios $h \in H$, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$\max Z = \sum_{a \in A} \sum_{g \in G} \sum_{h \in H} X_{agh} \quad (1)$$

Las restricciones del problema de calendarización de horarios se han dividido en varios bloques. El primer bloque de restricciones, asegura que se imparta a lo más una hora diaria por curso, para los cursos del componente básico. Dicha situación se representa mediante la ecuación (2):

$$\sum_{h \in H_d} X_{agh} \leq 1 \quad \forall a \in A_b, g \in G, d \in D \quad (2)$$

El segundo bloque de restricciones, asegura que se impartan determinado número de horas por curso a la semana, como se muestra en la ecuación (3). La Tabla 3 contiene el número de horas requerido por curso a la semana, T_a .

$$\sum_{h \in H} X_{agh} = T_a \quad \forall a \in A, g \in G \quad (3)$$

El tercer bloque de restricciones evita que se imparta el mismo curso en el mismo horario a diferentes grupos, como lo representa la ecuación (4):

$$\sum_{g \in G} X_{agh} \leq 1 \quad \forall a \in A, h \in H \quad (4)$$

El cuarto bloque de restricciones indica que ciertos cursos específicos deben impartirse cierto número de horas en ciertos días, en la ecuación (5). En la Tabla 3 se muestra la información para la instancia que se considera.

$$\sum_{h \in H_{ad}} X_{agh} = T_{ad} \quad \forall a \in A_p, g \in G \quad (5)$$

Finalmente, se integra la definición de las variables binarias en (6).

$$X_{agh} \in \{0,1\} \quad \forall a \in A, g \in G, h \in H \quad (6)$$

La herramienta usada en el análisis del problema de planificación de horarios, es el software de optimización llamado LINGO® 10, que con la licencia utilizada tiene capacidad para manejar 800 variables enteras y 7200 variables lineales. Se ha escogido esta herramienta debido a su entorno amigable y potente capacidad para resolver dichos problemas de Programación Matemática.

RESULTADOS

Se resuelve el modelo mediante la técnica de ramificación y acotamiento y usando un software de optimización. Se ha encontrado una solución óptima global en 4 segundos, se han identificado 735 variables enteras y 471 restricciones. De esta manera, se establecen los horarios de los cursos para cada uno de los grupos.

Para una representación más clara de la solución encontrada se han elaborado las tablas 4, 5 y 6. Cada una muestra la asignación de cursos para cada uno de los 3 grupos de Técnico Laboratorista Químico, de 5° semestre.

Tabla 4. Asignación de cursos Grupo 1.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
7:00 - 8:00	Física	Prob. y Est.	Prob. y Est.	Prob. y Est.	Prob. y Est.
8:00 - 9:00	Prob. y Est.	Física	Física	Física	Inglés
9:00 - 10:00	Inglés	Inglés	Inglés	Inglés	Ciencia y Tec.
10:00 - 11:00	Tutoría	Ciencia y Tec.	Componente Prof.2	Ciencia y Tec.	Componente Prof.2
11:00 - 12:00	Tutoría	Componente Prof. 1	Componente Prof.2	Componente Prof. 1	Componente Prof.2
12:00 - 13:00	-	Componente Prof. 1	-	Componente Prof. 1	-
13:00 - 14:00	-	-	Ciencia y Tec.	-	-

Tabla 5. Asignación de cursos Grupo 2.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
7:00 - 8:00	Prob. y Est.	Física	Física	Física	Inglés
8:00 - 9:00	Física	Prob. y Est.	Ciencia y Tec.	Prob. y Est.	Prob. y Est.
9:00 - 10:00	Tutoría	Componente Prof. 1	Componente Prof.2	Componente Prof. 1	Componente Prof.2
10:00 - 11:00	Inglés	Inglés	Inglés	Inglés	Ciencia y Tec.
11:00 - 12:00	-	-	-	Ciencia y Tec.	-
12:00 - 13:00	Tutoría	Ciencia y Tec.	Componente Prof.2	-	Componente Prof.2
13:00 - 14:00	-	Componente Prof. 1	Prob. y Est.	Componente Prof. 1	-

Tabla 6. Asignación de cursos Grupo 3.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
7:00 - 8:00	Inglés	Componente Prof. 1	Componente Prof.2	Componente Prof. 1	Ciencia y Tec.
8:00 - 9:00	Tutoría	Componente Prof. 1	Componente Prof.2	Componente Prof. 1	Componente Prof.2
9:00 - 10:00	Prob. y Est.	Prob. y Est.	Prob. y Est.	Prob. y Est.	Prob. y Est.
10:00 - 11:00	Física	Física	Física	Física	Inglés
11:00 - 12:00	-	-	-	Inglés	-
12:00 - 13:00	-	Inglés	Ciencia y Tec.	-	-
13:00 - 14:00	Tutoría	Ciencia y Tec.	Inglés	Ciencia y Tec.	Componente Prof.2

Los resultados arriba presentados ejemplifican el uso de la técnica de ramificación y acotamiento aplicada a la calendarización de horarios. Se encuentra un resultado factible que permite reducir de forma significativa el tiempo de calendarización de los cursos del CETIS 104.

DISCUSIÓN

El modelo para esta instancia se resolvió en 4 segundos en una computadora laptop con un procesador de 2.60 GHz y 4 GB memoria en RAM; usando el software de optimización. Como se puede observar en la calendarización de horarios, se cumple con todos los cursos en la asignación de días específicos, en el número de horas a impartir por día, en el número de horas totales, y en evitar que el horario-curso se asigne a más de un grupo.

Por otra parte, se observan horarios vacíos para cada grupo. Aunque no es una restricción del modelo, esas horas podrían tratar de acomodarse al final del turno para permitir a los alumnos retirarse anticipadamente en su turno. Cabe destacar que este requerimiento nunca se podrá alcanzar en un 100% debido a que la cantidad de aulas de clase no puede albergar a todos los cursos que tienen en un día.

Respecto a la condiciones deseables para la operatividad del sistema, el modelo propuesto asigna todos los cursos a grupos establecidos, no permite que un curso sea asignado a aulas de clase diferentes, no permite el empalme de asignaturas o salones en un mismo bloque horario y genera siempre al menos una combinación factible para los cursos de un semestre particular.

En la solución, las asignaciones de horarios resultaron consecutivas para aquellos cursos que requieren más de una hora por día. Esto podría no ocurrir en otras instancias, por lo que sería necesario agregar una restricción más para asegurar esto

En esta instancia se asignaron 28 horas de curso de 35 horas disponibles. Se esperaría que una instancia que asigne un número de horas cercano al límite, debido a las restricciones el problema, pueda resultar no factible, por lo tanto el modelo propuesto proporciona siempre un horario factible permitiendo al alumnado inscribir todos los cursos correspondientes a un semestre específico.

De acuerdo a la literatura consultada, se comprobó que la técnica de ramificación y acotamiento asegura que los horarios generados cumplan con las restricciones impuestas y entrega la flexibilidad de poder realizar asignaciones horarias parciales. Dicha técnica es estándar estándar, por lo cual su facilidad de uso permite que su modelamiento sea de fácil utilización y se adquieran soluciones rápidas y eficientes para el problema de timetabling. Siendo los resultados entregados muy aceptables.

En los resultados de técnica de ramificación y acotamiento en comparación con las soluciones obtenidas de forma manual, se aprecia que ambos cumplen con las restricciones principales del problema, la diferencia es el esfuerzo invertido en ello. La debilidad del modelo en la solución fue el cumplimiento de la restricción de continuidad.

CONCLUSIONES

La propuesta descrita en este trabajo es una manera viable para la solución de la calendarización de horarios a nivel de educación técnica media superior. Dicha propuesta, permitirá al personal realizar la calendarización de horarios de manera más eficiente, para todos los grupos del plantel, por especialidades, semestres y turnos.

El modelo matemático ha sido validado con éxito. Dicho modelo planteado encontró una solución factible que permitió una disminución del tiempo de trabajo de dos empleados de la Institución. Esto liberó tiempo a esos dos empleados para realizar otras tareas de planeación académica y administrativa, y permitió tener resultados rápidamente en caso de que requieran ser validados. El modelo es sencillo, pero planteó una herramienta que permitió hacer eficientes los procesos de toma de decisiones en instituciones educativas. Las restricciones propuestas verifican una óptima utilización del tiempo. Esta mejora permitió obtener una solución óptima en un corto tiempo y explorar múltiples escenarios, obtener soluciones alternativas y poder reaccionar ante eventos inesperados, como lo son la incorporación de cursos nuevos.

De la ejecución del modelo propuesto la complejidad de este radica en que no se pudo programar asignaturas en periodos consecutivos, sólo el primer grupo cumple con dicho requerimiento en un 80% de los días. Por lo anterior se concluye que el modelo cumple con los objetivos planteados pero con ciertas limitaciones, y reconociendo que hay aspectos por desarrollar que se pueden complementar con el recurso tecnológico y el humano. Este resultado muestra el grado de complejidad del problema abordado, y el esperado de acuerdo con la literatura consultada.

Trabajo Futuro

El presente trabajo tiene diversas áreas de oportunidad para desarrollar. Por ejemplo, se puede ampliar el modelo para planificar simultáneamente los horarios para todos los semestres de cada especialidad. Se puede adherir información a cada curso de especialidad, como número de horas consecutivas permitidas y/o necesarias, capacidad mínima de las salas a utilizar, equipo de cómputo especial, etc. Se podría integrar a la planificación el tiempo de receso de 15 a 30 minutos, de 1 a 2 veces por día. En paralelo se pueden desarrollar los horarios para profesores integrándolos con las solicitudes personales. Se puede extender el modelo para considerar la calendarización de horarios de todo el plantel. La función objetivo también podría ser diferente buscando maximizar ciertas preferencias de cursos a horarios.

REFERENCIAS

- ABDUL, S. Search methodologies for examination timetabling. PhD thesis, University of Nottingham, UK, 2012.
- ABSEHER, M. Solving Shift Design Problems with Answer Set Programming. Master Thesis, Faculty of Informatics, Vienna University of Technology, Austria, 2013.
- ARAGÚ, M., and SALIDO, M. Modelado y resolución del problema de asignación de horarios para el transporte ferroviario utilizando técnicas de satisfacción de restricciones. *Revista Gestión y Gerencia*, Agosto 2014, vol. 8, no 2, p. 45-68.
- BUSTOS, B., BARCELÓ P., and PAREDES, R. Generación de horarios académicos en Inacap utilizando algoritmos genéticos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile, 2014
- CARRASCO, B.B. Calendarización de horarios a enfermeras. Tesis de Licenciatura en Actuaría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.
- COBAS, K.M. Algoritmos genéticos aplicados a problemas de planificación. *Tesis, Universidad de las Ciencias Informáticas Facultad Regional Granma*, Manzanillo, México, 2013.
- CUBILLOS, M., QUIROGA, E., and SALAS, R. Problema del School Timetabling y Algoritmos Genéticos: Una Revisión. *Vínculos*, 2014, vol. 10, no. 2, p. 259-276, ISSN 2322-939X.

GUÉDEZ, C. Programación Lineal e Ingeniería Industrial. Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela, enero-junio, 2011, no. 6, p. 61-78.

HILLIER, F.S., and LIEBERMAN, G. J. Introduction to operations research. New York: McGraw Hill, 2001.

OJEDA, R. Programación lineal para la asignación de personal a horarios de trabajo: El caso de una empresa de atención telefónica en México. En XVII Congreso Internacional de Contaduría, Administración e Informática, México, México: 2012.

RESTREPO, E., MORENO, L. and VELÁSQUEZ M. Modelo para la asignación de recursos académicos en instituciones educativas utilizando la técnica metaheurística, búsqueda tabú. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, Diciembre-Sin mes, 111-123. ISSN 1657-7663

RIBIC, S., and KONJICIJA, S. Aplicación de programación lineal en dos fases para resolver el problema de asignación de horario escolar. International Conference on Information Technology Interfaces, Croacia, 2010, p. 651-656.

SÁNCHEZ-PARTIDA, D., MARTÍNEZ-FLORES, J.L., and OLIVARES-BENÍTEZ, E. An integer linear programming model for a university timetabling problem considering time windows and consecutive periods. *Journal of Applied Operational Research*, 2014, vol. 6, no.3, p.158–173.

SARMIENTO, A., TORRES, C., QUINTERO, C. and MONTOYA, J. Programación y asignación de horarios de clases universitarias: un enfoque de programación entera. En *Proceedings of the Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2012)*. p. 23-27.

SERRA, D. Métodos cuantitativos para la toma de decisiones. España: Ediciones Gestión 2000. 2004

TAHA, A. Traducción autorizada de la edición en idioma inglés, titulada Operations Research: An Introduction, Pearson Education, Inc. Novena Edición, México, 2012.

WREN, Anthony, A. Scheduling, Timetabling and Rostering- A Special Relationship? En Practice and Theory of Automated Timetabling. Lecture Notes in Computer Science, 1995, vol. 1153, pp. 46-75.

BIOGRAFÍA

Dra. Diana Sánchez-Partida. Es Profesora-Investigadora del Posgrado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro en la UPAEP, su área de interés es en Logística, Diseño y Optimización de la Cadena de Suministro y ha participado en proyectos aplicados en calendarización, niveles y control de inventarios y Planeación y Control de la Producción.

Dra. Catya Zuñiga-Alcaraz. Es parte del cuerpo Académico: Innovación en manufactura y materiales aeroespaciales reconocido por Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP). Cuenta con la distinción del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel Candidato del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y es parte del comité evaluador RCEA de dicho organismo. Su principal objetivo de investigación es el diseñar e implementar modelos optimización y simulación para la planeación y gestión de diversas operaciones tanto en el lado aire como en el lado tierra del sistema de tránsito aéreo.

Dr. Elias Olivares-Benitez. Es profesor y consultor en las áreas de Logística, Ingeniería Industrial e Ingeniería de Materiales. Su investigación está dirigida al desarrollo de métodos de optimización computacional de modelos logísticos y de manufactura, y al uso de mapas tecnológicos para la gestión de la innovación. Obtuvo el grado de Ingeniero Metalúrgico

por el Instituto Politécnico Nacional en 1996, la Maestría en Ciencias con especialidad en Sistemas de Manufactura y el Doctorado en Ciencias de Ingeniería con especialidad en Ingeniería Industrial por el Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, en 2003 y 2007 respectivamente. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias de Ingeniería (MSE) con especialidad en Ingeniería Industrial por Arizona State University en 2005. Ha publicado artículos en colaboración en revistas indizadas ISI y otras revistas arbitradas mexicanas e internacionales. Ha participado en congresos internacionales en EUA, Uruguay, Costa Rica, Brasil y México. Es miembro de la Sociedad Mexicana de Investigación de Operaciones, e-mail: eolivaresb@up.edu.mx.