

Asignación de cargas académicas en una Universidad a través de recocido simulado

Nelson Rangel, Jorge Jasso, Mario Rodríguez, José López, Jorge Hernández y Martha Butrón

N. Rangel, J. Jasso, M. Rodríguez, J. López, J. Hernández y M. Butrón.
Universidad Politécnica de Victoria, Departamento de Tecnologías de la Información Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, Carretera Victoria-Soto la Marina Km. 5.5, Cd. Victoria, Tamaulipas, C.P. 87138.
nrangelv@upv.edu.mx

M. Ramos., V. Aguilera., (eds.). Ciencias Administrativas y Sociales, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2013.

Abstract

The main goal in the research presented in this document is to solve the Time Tabling Problem in Universities (TTPU) in the Polytechnic University of Victoria. In particular, it is solved the case where a daily assignment must be done, pursuing the minimization in the number of used classrooms, and the idle hours for students, and teachers. The work presented in this paper shows the solution of the problem through the Simulated Annealing meta-heuristic. An analysis of the performance of the Simulated Annealing when solving the problem TTPU shows that the process that takes several hours, even days, could be done in just a few minutes with the proposed technique.

6 Introducción

La tarea de generar horarios es un problema que aparece al comienzo de cada periodo en cualquier universidad. Para resolver este problema, diferentes restricciones deben ser consideradas y éstas pueden variar dependiendo del cada caso en particular.

Principalmente las restricciones son asociadas con la disponibilidad de salones, maestros o con el número de clases a ser asignadas, etc. El caso general de este problema es NP-Completo (Garey & Johnson, 1979), lo cual significa que tratar de encontrar la solución óptima involucra el consumo de grandes recursos computacionales. A pesar de su complejidad, a lo largo de los años ha sido abordado con varias estrategias aproximadas, en las cuales pueden ser encontrados una amplia variedad de casos particulares del problema (Pillay, 2013).

Es difícil mencionar una solución exacta a este problema debido a su complejidad y a la cantidad de restricciones que están inmersas. Una alternativa, como fue dicho previamente, es el uso de meta heurísticas, las cuales ofrecen soluciones buenas en tiempos razonables, dependiendo de las restricciones involucradas.

La literatura generalmente clasifica las restricciones en dos tipos: suaves y duras (Yang, 2011).

Las restricciones duras son aquellas que deben ser cubiertas bajo cualquier circunstancia, por ejemplo, que no es posible que un maestro imparta dos clases diferentes de manera simultánea. Las restricciones suaves no necesariamente deben ser satisfechas, a diferencia de las duras. Sin embargo, se esperaría que sea satisfecho el número más grande de ellas. Ciertamente, es posible que el considerar todas no permitirá obtener una solución, por lo que el número de las mismas deba ser reducido.

Investigaciones de interés acerca de problemas relacionados al proceso de construcción de Horarios de clases en escuelas secundarias (Kwok, Kong & Kam, 1997) revela que, el 80% de las instituciones en Hong Kong usan computadoras para crear estos horarios. Una tercera parte de ellos emplean programas específicos, mientras el resto de las escuelas realiza sus horarios manualmente o usa computadora para analizar los conflictos.

De manera similar, en la Universidad Politécnica de Victoria (UPV), el problema de construir horarios de clases considera una combinación compleja de restricciones tanto suaves como duras, al inicio de cada periodo de clases. Originalmente, el problema fue resuelto de manera manual por los directores de programas, invirtiendo varias semanas para poder obtener una solución inicial con base en los datos existentes. Esta solución debía ser ajustada empleando el sentido común y el conocimiento de la situación.

Este trabajo presenta la metodología basada en meta heurísticas para la solución del caso específico de la generación de horarios de clase en la UPV, denotado como University Timetabling Problem (UTP), enfocándose en la reducción del tiempo invertido para su construcción. La solución, basada en metaheurística de Recocido Simulado (o SA, por las siglas Simulated Annealing), además de buscar cumplir con las restricciones previamente identificadas, busca reducir el número de horas libres inter clases, para maestros y alumnos, como el número de aulas, en ese orden específico. Es importante señalar que el enfoque hace posible la reducción del tiempo necesario para la generación de horarios de dos semanas a un par de minutos.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta el trabajo relacionado a problemas de generación de horarios en las universidades. La sección 3 describe el problema solucionado en este artículo. La sección 4 muestra la solución propuesta; en esta sección es mostrado el modelo de la solución y los elementos definidos por su solución teniendo como base el algoritmo de Recocido Simulado. La sección 5 muestra los resultados de la experimentación realizada. Finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones derivadas de la investigación.

6.1 Método

Trabajo Relacionado: Muchos autores, entre ellos, Schaerf (1995) y Werra (1985), creen que el problema de generación de Horarios (TTP por sus siglas en inglés) no puede ser completamente automatizado. Ellos justifican esta aseveración con las siguientes dos razones: un horario no es fácilmente presentado en un sistema automatizado, y por otro lado, como el espacio de investigación es enorme, la intervención humana podría ser útil para guiar la búsqueda hacia direcciones que el sistema de manera autónoma no iría. Debido a estas razones, la mayoría de los sistemas permiten la intervención humana para ajustar la solución final. Sin embargo, algunos sistemas requieren de la intervención humana, por lo que son llamados generadores de horarios interactivos.

Hay mucha y muy variada literatura acerca de TTP. Werra (1985) explica formalmente varios problemas y presenta su respectiva formulación. También, describe la investigación más importante en la cual la teoría de grafos es aplicada. Carter (1986) examina el problema de probar el TTP de una universidad, (Evaluación del Problema de Generación de Horarios Universitarios, UETTP por sus siglas en inglés) y se enfoca principalmente en la reducción del Problema de Grafos de Colores, (GCP).

Otras interesantes variaciones de esta clase de problemas y los enfoques empleados para solucionarlos usan diferentes meta heurísticas como Búsqueda Tabú (Schaerf, 1996).

En este trabajo (Schaerf, 1996), se asigna los maestros a los cursos que pueden ser ofrecidos. Él considera las restricciones típicas e estos sistemas como no asignar más de un curso al maestro en la mismo periodo de tiempo. En (Kohshori & Abadeh, 2012), se propone la solución para un problema similar a través de tres algoritmos híbridos (FGARI, FGATS, y FGASA) los cuales se basan en algoritmos genéticos en combinación con lógica difusa, y guiados por algoritmos de búsqueda Tabú, Recocido Simulado y búsquedas iterativas aleatorias.

Abramson (1991) presenta una técnica de optimización al aplicar el algoritmo de Recocido Simulado. Él permite dar un valor a cada uno de los componentes volviendo más importantes unos que otros.

Chin-A-Fat (2004) introduce una solución del problema de generación de horarios a nivel bachillerato. Su solución está basada en una serie de restricciones duras. Esta solución fue implementada en algunas escuelas con diferentes clases de restricciones.

Los artículos encontrados durante esta investigación tratan con problemas, que aunque son considerados TTP no solucionan exactamente el mismo problema desde diferentes perspectivas, como sucede con el problema descrito en este estudio.

6.2 Definición del Problema

Podría decirse que hay un horario previamente determinado para todas las actividades que el ser humano realiza diariamente. Hay un problema común detrás de todas esas actividades el es conocido como el Problema de Calendarizar (SP por sus siglas en inglés), la solución que determina lo que hay que hacer y cuando. Anthony Wren (1996) define el problema de SP como: la Calendarización puede ser vista como el ordenamiento de objetos dentro de un patrón en tiempo y espacio de al forma que algunas metas son alcanzadas, o casi alcanzadas y que las restricciones de los objetos son completamente satisfechas o casi satisfechas en su totalidad.

El problema de horarios es un caso específico del SP. Wren (1996) hace la distinción entre estos dos problemas definiendo el problema de generación de horarios como: “los horarios muestran cuando eventos particulares tomarán lugar. No necesariamente implica una asignación de recursos” lo cual significa que para el TTP es más importante solucionar cuando sucederán los eventos que indicar donde ocurrirán.

En el caso específico de la UPV, la universidad siempre ha tenido el UTP. Cada periodo los directores toman más de 15 días para elaborar una solución de forma manual. Una vez que se ha finalizado, ellos usan una hoja de cálculo para representar esta solución dándole una mejor organización. Así el proceso se vuelve repetitivo buscando en cada iteración una mejor solución.

En este estudio, se pretende construir un sistema de información basado en una meta heurística, específicamente el algoritmo de Recocido Simulado. El problema a ser solucionado en la generación de Horarios académicos en la UPV está compuesto por las siguientes entidades: Días y periodos de tiempo. Hay cinco días laborales en una semana a ser considerados para tal aspecto. Cada día es dividido en 12 bloques, así, en una semana hay 60 bloques de una hora. Además de los bloques de tiempo, hay otros elementos principales como lo son: aulas, maestros, grupos, clases, horas muertas (horas sin uso).

Clase: es la materia que debe ser asignada a un maestro para poder construir un horario. Aula: se refiere a cada espacio señalado para la impartición de clases.

Maestro: cada maestro tiene un horario de disponibilidad en particular durante la semana y tiene un perfil para enseñar ciertas clases.

Grupo: se refiere a un conjunto de materias en los cuales el número más alto debe ser 7. Tiempo muerto: intervalos de tiempo de horas no asignadas para maestros, y conjuntos de grupos. También son conocidas como horas libres o tiempo libre.

El estudio del UTP involucra tanto restricciones suaves como duras, las cuales son las siguientes:

Restricciones duras:

1. Un maestro no puede enseñar más de una clase en el mismo grupo.
2. Un maestro no puede enseñar más de una clase al mismo tiempo.
3. Una aula no puede ser ocupada por más de un maestro al mismo tiempo.
4. Hay un número finito de aulas el cual no puede ser excedido.

Restricciones suaves:

1. Un maestro tiene un número máximo de clases que puede enseñar.
2. Un grupo no debe tener tiempo libre.
3. Un maestro no debe tener tiempo libre.
4. No debe haber más de dos horas de la misma clase en un mismo día.

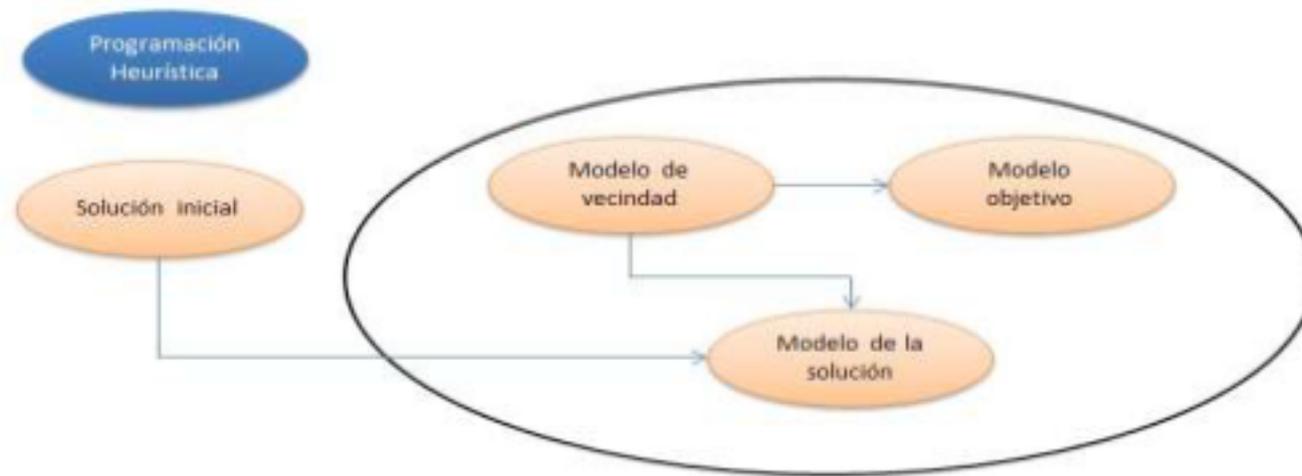
En la forma más general, el UTP resuelto en esta investigación debe de involucrar la solución de los siguientes problemas: a) la asignación de clases a maestros; b) la distribución de las horas correspondientes a cada clase durante la semana; c) la construcción de un horario para cada maestro; y d) la asignación de aulas.

La siguiente sección presenta el enfoque propuesto para solucionar el UTP.

6.3 Estrategia de Solución Propuesta

La metodología seguida para solucionar el UTP estudiado en este artículo se muestra en la Figura 6. Está basada en Programación Heurística, en particular en el uso de Recocido Simulado. El objetivo principal que se persigue es la asignación de aulas a clases y el horario a maestros.

Figura 6 Metodología de solución para el Problema UTP presente en la Universidad Politécnica de Victoria

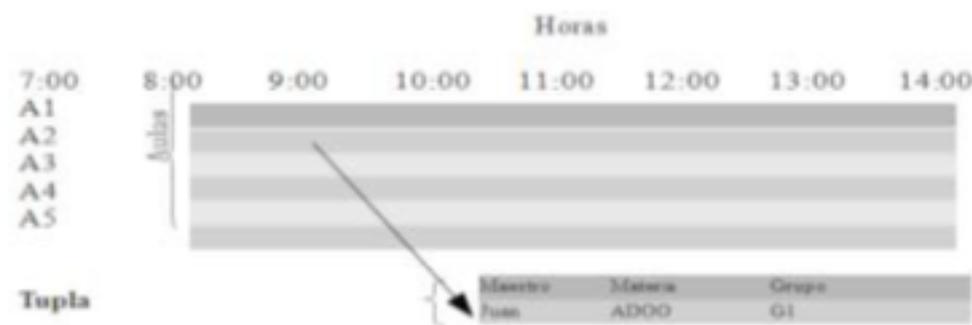


Las restricciones a ser consideradas en el Problema UTP son: a) un maestro no puede enseñar dos clases al mismo tiempo; b) un aula no puede ser asignada a dos clases al mismo tiempo; c) un grupo no puede tener dos clases al mismo tiempo; y d) los maestros deben estar calendarizados en bloques de tiempo que se ajusten a ellos.

Para solucionar este último sub problema, la meta heurística de Recocido Simulado (SA) fue usada (Kirkpatrick, Gelatt & Vecchi, 1983). Este algoritmo requiere la definición de los siguientes elementos: a) un modelo de solución; b) una solución inicial; c) una función de vecindad; d) una función de evaluación; y e) los parámetros necesarios para el algoritmo: temperatura inicial T_i , temperatura final T_f , factor de enfriamiento α , y la longitud de la Cadena de Markov L . Una descripción detallada de estos elementos es presentada en el resto de esta sección.

6.4 Representación de la Solución

Para implementar el Recocido Simulado, la solución para el UTP fue representada como una matriz bidimensional M , donde las filas representan las aulas, sus columnas los distintos bloques de tiempo, y los valores de cada celda contendrán una tupla $T = (T, G, C)$, representando los maestros, grupos, y las clases a ser enseñadas. Un ejemplo de esta representación puede ser vista en la tabla 6.

Tabla 6 Modelo de Representación de de Solución del para el UTP

En el resto del documento, los valores a ser calendarizados serán llamados tuplas y denotados por $T = (T, G, C)$, y representados por los tres elementos: maestros(T), grupos(G) y clases(C).

6.5 Solución Inicial

La construcción de una solución inicial sigue una heurística voraz simple, busca el primer bloque de tiempo disponible en un aula para asignar la tupla T. La asignación del aula y el bloque de tiempo es hecho en orden incremental en ambos casos, considerando primero el aula y navegando a través de los diferentes bloques de tiempo.

Un ejemplo de construcción de esta estrategia se ilustra en la Figura 5.2. La Figura 3a Muestra un conjunto de maestros con las materias que van a impartir, los grupos a que pertenecen y una guía para facilitar su seguimiento. La Figura 3b muestra la disponibilidad de horario de los maestros, el símbolo X denota que no puede esta disponible a esa hora, y el símbolo \checkmark denota que sí es posible. La Figura 3c muestra el resultado de aplicar el algoritmo, los maestros se fueron asignando a los horarios en el orden en que están listados dentro de la tabla 6.1, respetando las restricciones del problema UTP abordado.

Tabla 6.1 Ejemplo de Solución Inicial construida mediante estrategia Avara

a) Maestro-Materias a asignar

	7:00	8:00	9:00	10:00
A	\checkmark	X	\checkmark	\checkmark
B	\checkmark	\checkmark	X	\checkmark
C	X	\checkmark	\checkmark	\checkmark
D	\checkmark	X	\checkmark	X

b) Horario de Disponibilidad

	7:00	8:00	9:00	10:00
Aula 1	A1G1	B2G1	A1G2	B2G2
Aula 2	D3G2		C3G1	D4G1
Aula 3		C4G2		
Aula 4				

c) Matriz M

Maestro	Materia	Grupo	Guía
A	1	G1	A1G1
A	1	G2	A1G2
B	2	G1	B2G1
B	2	G2	B2G2
C	3	G1	C3G1
C	4	G2	C4G2
D	3	G2	D3G2
D	4	G1	D4G1

6.6 Función de Vecindad

La función de vecindad también sigue una estrategia simple; fue basada en la regla de la ruleta al escoger de forma aleatoria un maestro o un grupo que tenga un número de horas libres mayores a cero. Una vez que el maestro/grupo fue seleccionado, su bloque de tiempo mínimo y máximo son ubicados en las celdas de la matriz M que contiene la solución actual. Después que, la búsqueda voraz es ejecutada para identificar las aulas con el bloque de tiempo entre el mínimo y máximo bloque de tiempo, previamente obtenido, que minimiza el número de horas libres entre ellas, intercambiando la m o M .

La tabla 6.2 muestra un ejemplo de la aplicación de esta función. En la Figura 4a se presenta una Matriz M ya creada. Después se asignan probabilidades a cada maestro, de acuerdo al número de horas libres que tienen, lo cuál se ilustra en la Figura 4b. Una vez asignadas las probabilidades se hecha la ruleta, es decir, se selecciona un maestro al azar considerando las probabilidades calculadas. El siguiente paso, mostrado en la Figura 5.3c, consiste en intercambiar el elemento seleccionado en el paso anterior con aquel que mejore la situación actual, o bien, el que menos la empeore. Finalmente se repite el proceso nuevamente hasta converger a una solución aceptable (ver tabla 6.2).

Tabla 6.2 Ejemplo de aplicación de la Función de Vecindad diseñada para resolver el UTP

	7:00	8:00	9:00	10:00
Aula 1		B2G1	A1G2	B2G2
Aula 2	D3G2		C3G1	D4G1
Aula 3		C4G2		
Aula 4				

a) Matriz M inicial

	7:00	8:00	9:00	10:00
Aula 1	A1G1	B2G1	B2G2	A1G2
Aula 2	D3G2		C3G1	D4G1
Aula 3		C4G2		
Aula 4				

c) Se hace el intercambio

Maestro	Horas Libres	Probabilidad	Distribución
A	1	0.25	0.00 – 0.25
B	1	0.25	0.25 – 0.50
C	0	0.00	No Aplica
D	2	0.50	0.50 – 1.00

b) Elemento al azar seleccionado (en rojo).

Maestro	Horas Libres	Probabilidad	Distribución
A	2	0.50	0.00 – 0.50
B	0	0.00	No Aplica
C	0	0.00	No Aplica
D	2	0.50	0.50 – 1.00

d) Se repite el proceso

6.7 Función de Evaluación

El propósito de estudio en esta investigación es analizar el desempeño del Recocido Simulado empleando diferentes funciones de evaluación.

Para realizar esto, un conjunto de diferentes funciones de evaluación fue propuesto, cada una de ellas midiendo los valores objetivo en el UTP, minimizando el número de aulas, minimizando el tiempo libre de los maestros, y minimizando el tiempo libre de los grupos.

La función de evaluación propuesta, denotada como *CGT* (por las siglas de Classroom- Group-Teacher), favorece la prioridad preestablecida entre los tres objetivos expuestos, aulas, grupos, y maestros; ésta función se define como se muestra en la Ecuación 6.

$$I_C \cdot F + I_G + \frac{I_T}{\max\{I_T, \}} \quad (6)$$

El significado de la nomenclatura en Ecuación 6 es como sigue: el valor I_C es el número de aulas requeridas para hacer la asignación.

El valor I_G son el total de horas libres que hay entre grupos. El valor I_T es el número de horas libres de los profesores; y $\max\{I_T\}$ es el número máximo de horas libres posibles para un profesor (con el propósito de normalizar entre 0 y 1 dicha cantidad). Finalmente, el factor F es un valor lo suficientemente grande para evitar traslape entre I_C e I_G .

La forma de organizar los objetivos en la función propuesta da prioridad al número de aulas, posteriormente posteriormente buscará mejorar las horas libres de los grupos, y finalmente perseguirá la mejora en la reducción del número de aulas.

Un ejemplo de la aplicación de esta función de evaluación se ilustra en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Ejemplo de uso de la Función de Evaluación Propuesta para resolver UTP

	7:00	8:00	9:00	10:00
Aula 1	A1G1	B2G1	A1G2	B2G2
Aula 2	C3G2		D4G1	C3G1
Aula 3		C4G2		
Aula 4				

a) Matriz M

Maestro	Horas Libres	Grupo	Horas Libres	Aulas	Usada
A	1	G1	0	Aula 1	Si
B	1	G2	0	Aula 2	Si
C	1	Total	0	Aula 3	Si
D	1			Aula 4	No
Total	4			Total	3

$I_c = 0$

$I = 4$
 $\max\{I_i\} = 16$

$I_c = 3$
 $F = 10$

b) Distribución de Horas

c) Aplicación de la Fórmula

$$I_c \cdot F + I_c + \frac{I}{\max\{I_i\}} = 3 \cdot 10 + 0 + \frac{4}{16} = 30.25$$

6.8 Parámetros del Recocido Simulado

Los parámetros del algoritmo de Recocido Simulado considerados en esta investigación fueron la temperatura inicial y final (denotada por T_i y T_f , respectivamente), el factor de enfriamiento α , y la longitud de la cadena de Markov L . Los valores considerados fueron tomados de la literatura y son presentados en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Parámetros utilizados para configurar el Recocido Simulado

Parámetro	Valores		
	0	1	2
T_i	15	10	1
T_f	0.001	0.000001	0.000000001
α	0.99	0.95	0.90
L	10	100	1000

6.9 Resultados

La sintonización de parámetros es el proceso de ajustar los parámetros de un algoritmo para solucionar un problema. Para el propósito de ajustar y medir el desempeño del SA, es seguida una metodología basada en Coverings Arrays, como se presenta en (Rangel-Valdez, Torres-Jimenez, Bracho-Ríos & Quiz-Ramos, 2009).

Un Covering Array (CA) (Avila-George, Torres-Jimenez & Hernandez, 2012; Torres-Jimenez & Rodriguez-Tello, 2012) es un arreglo M de tamaño $N \times k$ consistiendo de N vectores de longitud k con entradas desde $\{0, 1, \dots, v-1\}$ (v es el tamaño del alfabeto) tal que cada uno de los v^t posibles vectores de tamaño t ocurra al menos una vez en cada posible selección de t elementos de los vectores. El parámetro t es conocido como fuerza.

Los experimentos diseñados están basados en una instancia β del UTP, un Covering Array $CA(N; t, k, v)$ para estudiar el efecto de la interacción entre los parámetros del enfoque de SA, y el conjunto de las diferentes funciones, descritas previamente. En el experimento, el desempeño en términos de la calidad de la solución del enfoque SA, así como el tiempo invertido en encontrarlo fueron medidos por cada diferente configuración derivada por el CA y las funciones de evaluación. Para este propósito, cada configuración fue usada para solucionar la instancia 31 veces, y se obtuvieron mínimos, máximos y promedios.

Para tener una idea de la complejidad del problema UTP resuelto, las características más relevantes de la instancia son descritas en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Características generales del problema UTP resuelto para la Universidad Politécnica de Victoria

Informacion	Cantidad
Información	Cantidad
Número de Profesores	27
Máximo Número de Clases por Maestro	3
Número de Aulas	17
Número de Grupos	14
Número de Horas por Día	12
Número de Materias	67
Número de Días	1

Fueron usados los Coverings Arrays mostrados en la Tabla 6.6. El número de columnas k es 4 y cada una de ellas representa uno de los parámetros del SA.

El número de filas es 9, es decir el número de combinaciones que cubren todas las diferentes parejas de valores derivados de los parámetros como es definido en (Avila-George, et al., 2012) y representa el nivel de interacción $t=2$. Esta característica permitió reducir el número de casos de prueba para minimizar el tiempo requerido en la experimentación.

Tabla 6.6 Configuraciones construidas a partir del CA(9;2,4,3)

0	0	0	0
1	1	1	0
2	2	2	0
0	1	2	1
1	2	0	1
2	0	1	1
0	2	1	2
1	0	2	2
2	1	0	2

a) CA(9;2,4,3) abstracto.

Config. No.	Parámetros			
	T	f	α	L
0	15	0.001	0.99	10
1	10	0.000001	0.95	10
2	1	0.000000001	0.90	10
3	15	0.000001	0.90	100
4	10	0.000000001	0.99	100
5	1	0.001	0.95	100
6	15	0.000000001	0.95	1000
7	10	0.001	0.90	1000
8	1	0.000001	0.99	1000

b) Configuraciones del Recocido Simulado

Un resumen de los resultados derivados a partir del diseño de la experimentación es presentado en la Tabla 6.7. En la misma, el tiempo es presentado en milisegundos. También, se presenta la calidad promedio de la solución obtenida por cada una de las configuraciones probadas.

Tabla 6.7 Resumen de los resultados obtenidos e resolver la instancia de UTP usando el SA propuesto en este trabajo de investigación

N	Función de Evaluación	Config	F	Costo Mínimo	Costo Máximo	Costo Promedio	Tiempo Mínimo	Tiempo Máximo	Tiempo Promedio
1	CGT	0	10000	60032.105	60043.105	60035.976	186	1032	276.51
2	CGT	1	10000	60032.105	60042.050	60034.359	60	131	72.16
3	CGT	2	10000	60028.121	60043.035	60035.121	38	127	51.12
4	CGT	3	10000	60028.109	60043.035	60035.457	281	887	362.09
5	CGT	4	10000	60030.105	60042.050	60034.109	4222	5391	4702.25
6	CGT	5	10000	60031.109	60043.035	60035.191	246	1104	324.54
7	CGT	6	10000	60030.105	60043.035	60034.875	8012	10668	9062.25
8	CGT	7	10000	60030.105	60043.035	60035.421	1611	2682	2008.93
9	CGT	8	10000	60030.105	60042.050	60033.691	24273	30060	26681.35

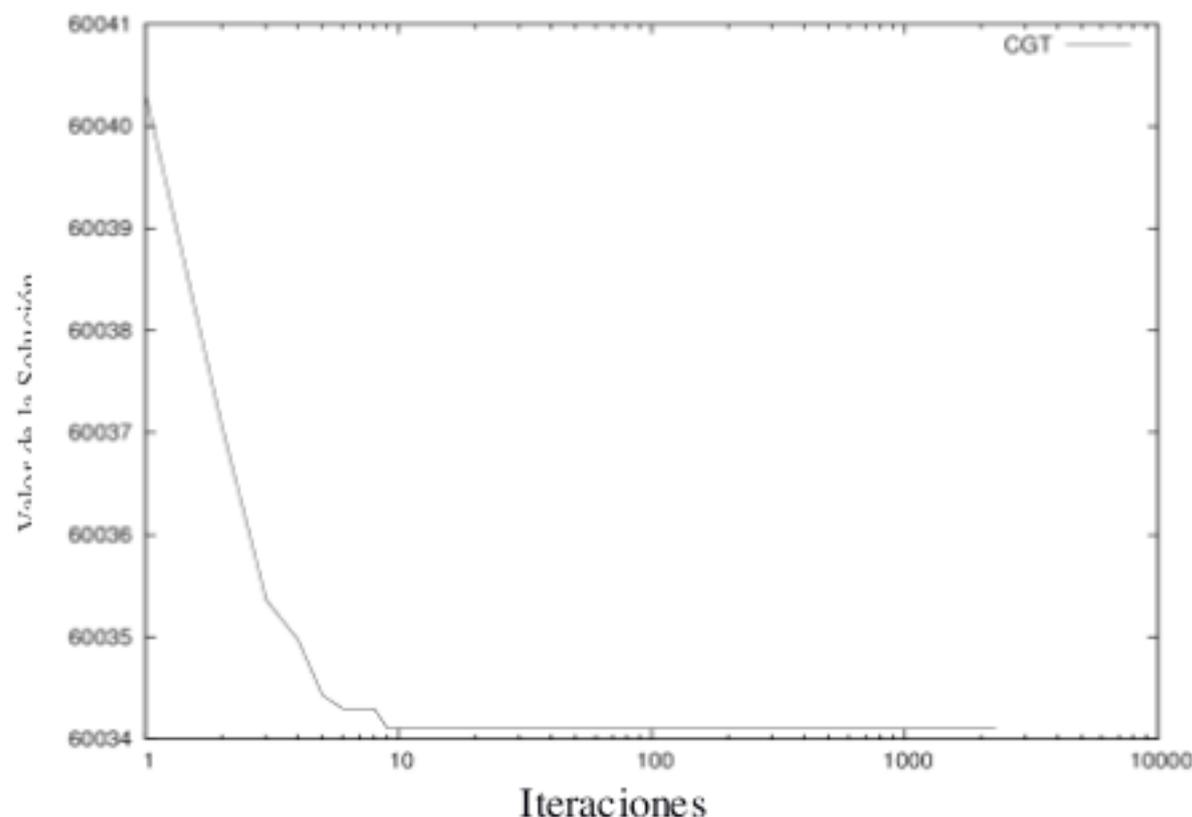
6.10 Discusión

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 6.2, el máximo tiempo requerido fue de alrededor 30 segundos, en la configuración (CGT, 9). También, dependiendo de la configuración empleada, diferentes resultados fueron obtenidos, por ejemplo la reducción en el número de aulas (el mínimo fue 6), el número de horas libres por maestro en el mejor de los casos llegó a ser de hasta un 3.5% (ver configuración CGT 3, máximo costo), y en el peor de los casos ascendió hasta un 12% (ver configuración CGT 3, mínimo costo). El número de horas libres entre los grupos osciló entre 28 y 42, tomando en cuenta que fueron 14 grupos los programados, esto representaba un promedio de horas libres por grupo de 2 a 3, en los mejores y peores casos, respectivamente.

La mejor configuración que se puede observar es la CGT 4, dado logró hacer la programación de horarios con el menor número de aulas (usando 6), el menor número de horas libres entre grupos, de 28, y el segundo menor porcentaje de horas libres de los maestros, de 10.9%. También se puede observar que este comportamiento fue muy similar para CGT 4, tanto en el menor, mayor, y caso promedio en cuanto a la calidad de la solución. En cuanto a tiempo, la mejor configuración se puede argumentar que es la CGT 3, debido a que el tiempo requerido es inferior a la CGT 4, pero con una calidad de solución muy similar.

Por otro lado, la configuración CGT 8 obtuvo el mejor promedio en calidad de solución, sin embargo, el tiempo requerido para converger a esa solución fue demasiado alto en relación a las demás, por lo cual no se considera dentro de las mejores.

Grafico 6 Gráfica del computamiento del Recocido Simulado con la mejor configuración (CGT 4)



6.11 Conclusiones

El presente trabajo resuelve un caso real y particular del problema de construcción de horarios universitarios (UTP) en la Universidad Politécnica de Victoria, México. La solución presentada reduce el tiempo de construcción de un horario pasando de dos semanas a unos cuantos segundos.

El enfoque presentado está basado en el algoritmo de Recocido Simulado (SA). El SA trabajó con un conjunto de diferentes configuraciones, cada una de las cuales fue probada en un caso particular de programación de horarios para un día de la semana. Fue posible obtener una asignación empleando solo 6 de las 17 aulas disponibles, pero teniendo casi el 10% de las horas disponibles totales de los maestros, como horas libres, y un total de 30 horas libres entre los grupos.

Finalmente, el trabajo presentado se está desarrollando para ir incorporando gradualmente otras restricciones actualmente no consideradas, como lo es el número de grupos a ser abiertos, restricciones en la asignación de aulas a clases, entre otras.

6.12 Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido del proyecto “Estudio de los Sistemas de Información para la Integración en Base a la Calidad de Información y a la Experiencia de Usuario proporcionada” de FOMIX CONACYT; el proyecto “Análisis de la Dificultad del Problema de Minimización de Ancho de Banda en Grafos por medio de Pareja de Invariantes” aprobado en oficio /103.5/12/3620 del Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP).

6.13 Referencias

Abramson, D.: Constructing school timetables using simulated annealing: Sequential and parallel algorithms. *Management Science* 37(1), 1–17 (1991).

Avila-George, H., Torres-Jimenez, J., Hernandez, V.: New bounds for ternary covering arrays using a parallel simulated annealing. *Mathematical Problems in Engineering* (Accepted on July 07, 2012).

Carter, M.: A survey of practical applications of examination timetabling algorithms. *Operations Research* 34(2), 193–202 (1986).

Chin-A-Fat, K.: School timetabling using satisfiability solvers. a method to construct timetables for dutch secondary education. Ph.D. thesis, Delf University of Technology (2004)-

Garey, M., Johnson, D.: *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP Completeness*. Freeman: San Francisco. (1979). ISBN: 0-7167-1045-5.

- Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M.: Optimization by simulated annealing. *JSTOR* 220(4598), 671–680 (1983).
- Kohshori, M., Abadeh, M.: Hybrid genetic algorithms for university course timetabling. *International Journal of Computer Sciences* 9, 446–455 (2012).
- Kwok, L., Kong, S., Kam, Y.: Timetabling in hong kong secondary schools. *Computer & Education* 28, 173–183 (1997).
- Pillay, N.: A survey of school timetabling research. *Annals of Operations Research* pp. 1–33 (2013).
- Rangel-Valdez, N., Torres-Jimenez, J., Bracho-Ríos, J., Quiz-Ramos, P.: Problem and algorithm fine-tuning - a case of study using bridge club and simulated annealing. In: A. Dourado, A.C. Rosa, K. Madani (eds.) *IJCCI*, pp. 302–305. INSTICC Press (2009).
- Reeves, C.R. (ed.): *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. McGraw - Hill (1995).
- Schaerf, A.: A survey of automated timetabling. Tech. rep., Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), Amsterdam, The Netherlands (1995).
- Schaerf, A.: Tabu search techniques for large high-school timetabling problems. In: *Proceeding of the 13th National Conference of the American Association for artificial Intelligence* (1996).
- Torres-Jimenez, J., Rodriguez-Tello, E.: New bounds for binary covering arrays using simulated annealing. *Information Sciences* 185(1), 137–152 (2012).
- Werra, D.D.: An introduction to timetabling. . *European Journal of Operational Research* 19, 151–162 (1985).
- Wren, S.: Timetabling and rostering a special relationship? *The Practice and Theory of Automated Timetabling: Selected Papers from the 1st International Conference*. *Lecture Notes in Computer Science* 1153, 46–75 (1996).
- Yang, S., Jat, S.: Genetic algorithms with guided and local search strategies for university course timetabling. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on* 41(1), 93–106 (2011).

