

## **Análisis de la influencia de funciones de evaluación en el desempeño de un enfoque de recocido simulado para la solución del problema de generación de horarios universitarios**

Nelson Rangel, Jorge Jasso, Mario Rodriguez, Jose Lopez, Jorge Hernandez, Martha Butron y Gustavo Bujano

Nelson Rangel, Jorge Jasso, Mario Rodriguez, Jose Lopez, Jorge Hernandez, Martha Butron y Gustavo Bujano.

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 de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2013.

## **Abstract**

The Timetabling Scheduling problem is common in many universities. This problem has been solved using a wide variety of strategies, which can be found in the scientific literature, each with a particular perspective commonly involving different sets of constraints. The work presented in this paper shows the solution of the problem in the Polytechnic University of Victoria, Mexico. There, it takes two weeks to manually solve the problem. The research proposed the use of Simulated Annealing to reduce the time required to create the schedules. The resulting methodology relaxed the problem into three simpler subproblems that solve the assignment, distribution, and scheduling of classes. An analysis of the performance of the SA over different evaluation functions is presented. The results show an improvement in the time required for the construction, reducing it to less than one minute.

## **3 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, M., Johnson, D., 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, N., 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, S., Jat, S., 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, L., Kong, S., Kam, Y., 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. Además, es presentado un análisis de diferentes implementaciones, reportando la mejor de ellas.

Un novedoso enfoque seguido como la estrategia empleada es, la consideración de la división del problema en diferentes fases, tal que éste es aligerado en las restricciones y llega a ser más fácil de resolver. Estas fases son: a) la asignación de clases a maestros; b) la distribución de horas académicas (tiempo para cada clase de los maestros) durante la semana laboral; y c) la designación de las aulas y horas para maestros y clases. Todas ellas, cumpliendo las restricciones previamente identificadas, buscan la optimización de aulas y la reducción de horas libres inter clases. 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; in 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.

### **3.1 Método**

Trabajo relacionado: Muchos autores, entre ellos, Schaerf (Schaerf, A., 1995) y Werra (Werra, D.D., 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 (Werra, D.D.,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 (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, A.,1996).

En este trabajo (Schaerf, A., 1996), Schaerf 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, M., Abadeh, M., 2012) , Meysam y Mohammed proponen 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 (Abramson, D., 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 (Chin-A-Fat, K., 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.

### 3.2 Definición del problema

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 otras elementos principales como lo son: aulas, maestros, grupos, clases, horas muertas (horas sin uso). La clase es la materia que debe ser asignada a un maestro para poder construir un horario. El Aula se refiere a cada espacio señalado para la impartición de clases. El maestro tiene un horario de disponibilidad en particular durante la semana y tiene un perfil para enseñar ciertas clases.

El grupo se refiere a un conjunto de materias en los cuales el número más alto debe ser 7. El tiempo muerto son 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) un 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.

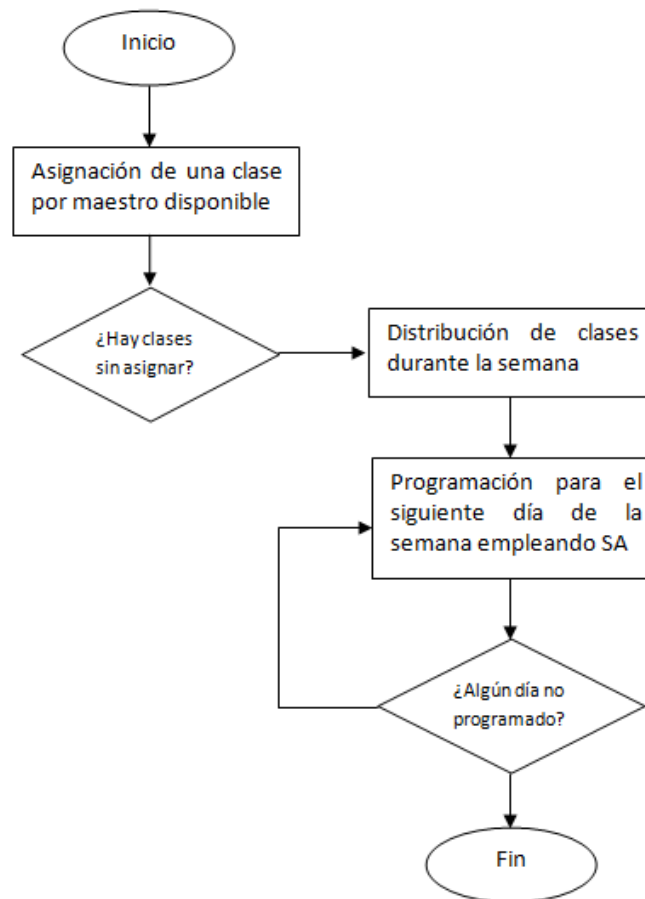
La siguiente sección presenta el enfoque propuesto para solucionar el UTP.

### 3.3 Metodología

Esta sección describe la metodología seguida para solucionar el caso particular del UTP estudiado en este artículo. Para garantizar la solución para este problema, fue dividido en tres diferentes sub problemas los cuales son esquematizados en la Figura 1. Básicamente, los tres problemas principales cubren las siguientes características: a) la asignación de clases a maestros; b) la distribución de las clases durante la semana; c) la asignación de aulas a clases y el horario a maestros. El resto de esta sección detalla de manera más amplia cada una de las fases de esta metodología. Solución de la asignación de clases a maestros.

El UTP considerado considera que las clases deben ser enseñadas bajo los siguientes términos. Para este propósito, las clases son organizadas en grupos, los cuales están asociados a un periodo en particular. Cada grupo tiene un número finito de clases, y la asignación de las mismas a los maestros deben cumplir las siguientes restricciones: a) un maestro tiene un conjunto de clases que puede impartir previamente definido; b) dos diferentes clases del mismo grupo no pueden ser asignadas a un mismo profesor; y c) un maestro tiene un número máximo de clases que puede impartir.

**Figura 3** Metodología de solución para el problema de UTP

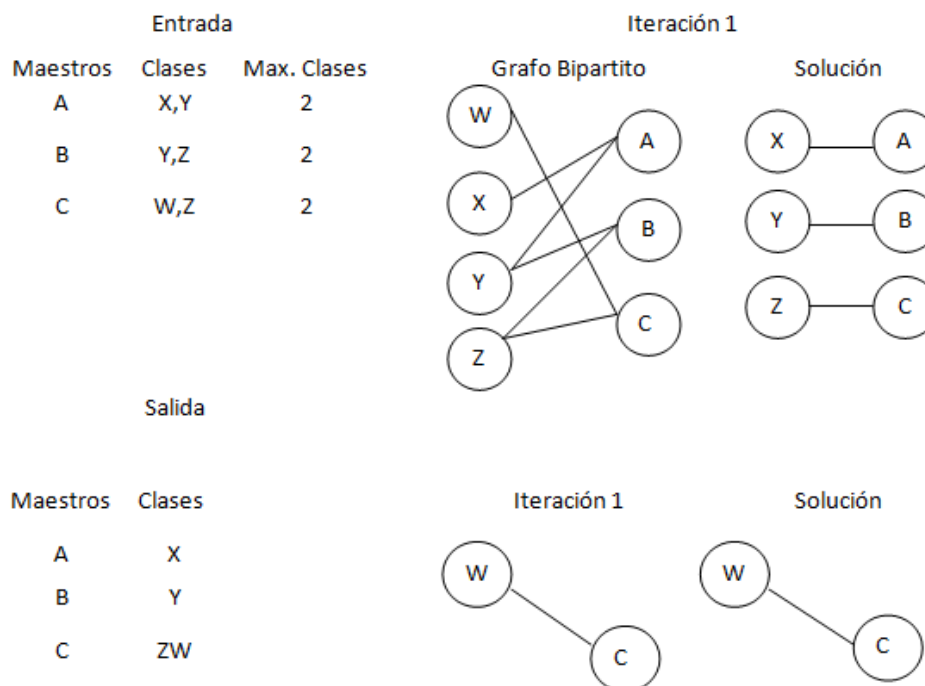


La solución al problema de asignación descrito brevemente en el párrafo previo es el primer paso en la metodología propuesta en este artículo. No es posible ir más allá de este paso sin solucionar este sub problema. Para hacer esto, un enfoque determinístico basado en la solución del problema del “emparejamiento perfecto” es presentado y es descrito en el siguiente párrafo.

Primero, un grafo bipartito B es generado contando con un conjunto de nodos formado por las clases a ser impartidas y los maestros disponibles para esta acción.

Entonces el conjunto de aristas es formado por la asignación de una clase a un maestro siempre y cuando la asignación sea posible. Por ejemplo, cuando un maestro es definido para enseñar una determinada clase. Habiendo construido el grafo B, el siguiente paso es la solución del problema del máximo emparejamiento (MMP) (Reeves, C.R. (ed.), 1995), el cual asignará el máximo número de clases a los maestros. Este proceso es repetido hasta que todas las clases son asignadas, considerando en la transición de una iteración a otra que las asociaciones entre clases y maestros deben ahora considerar las restricciones previamente descritas. La Figura 3.1 muestra un ejemplo gráfico de la solución de este sub problema.

**Figura 3.1** Ejemplo de la solución de la asignación de clases a maestros



Distribución de las clases durante la semana. El segundo sub problema a ser resuelto en la metodología propuesta es la distribución de clases durante la semana con base en las restricciones que una clase tiene un número máximo de horas, y que no puede tener más de dos horas en un día. Para este propósito, el sub problema es modelado también como el problema de emparejamiento máximo como se describe en los siguientes párrafos.

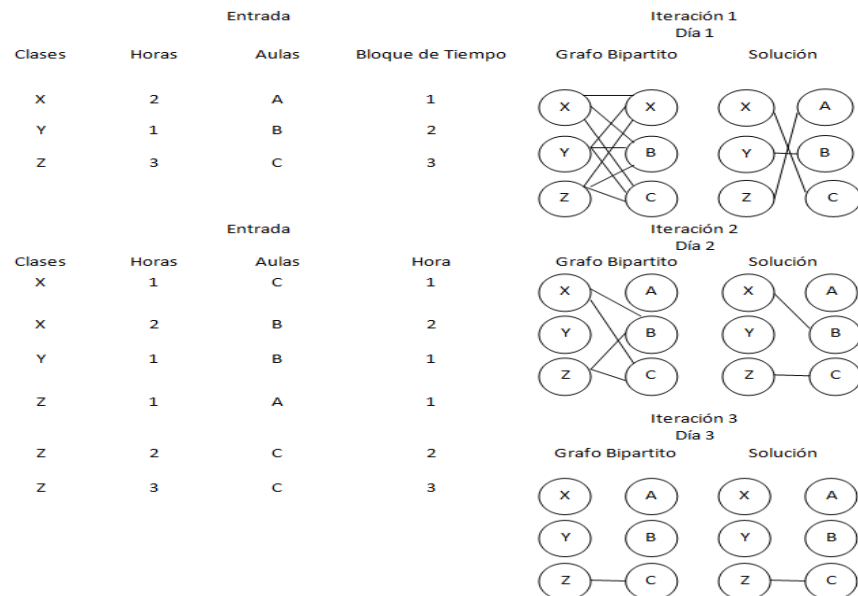
Primero, un grafo bipartito, donde es el conjunto de nodos, y  $E$  es el conjunto de aristas, será construido teniendo un nodo por clase, y tendrá un nodo aula durante un día, y una arista existirá siempre que una clase pueda ser asignada a un aula conforme las restricciones iniciales.

El siguiente paso consiste en solucionar el problema del emparejamiento máximo, el cual asignará clases a las aulas. La solución de este problema puede ser entendida como la asignación de una hora de clase a un aula. Tomando en cuenta que hay un número finito de horas por clase y de aulas, lo siguiente es registrar la asignación, tal que el grafo  $B$  es actualizado de manera que las uniones entre clases y aulas será habilitada si esas clases/aulas tienen horas disponibles para ser asignadas, y también tomando en cuenta que no pueden ser asignadas más de dos horas en el mismo día. El proceso es repetido, decidiendo arbitrariamente en cada paso que día será calendarizado, hasta que todas las horas de las clases son asignadas. La Figura 3 muestra un ejemplo gráfico de la solución de este sub problema.

Solución del problema de horario por día de clase. El último paso de la metodología de la solución tiene que ver con la construcción del horario final, el cual programa las clases a las aulas y habilita los bloques de tiempo. Las restricciones a ser consideradas en este punto 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, S., Gelatt, C., Vecchi, M., 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, temperatura final, factor de enfriamiento  $\alpha$ , y la longitud de la Cadena de Markov. Una descripción detallada de estos elementos es presentada en el resto de esta sección.



**Figura 3.** Ejemplo de la solución de la distribución de clases

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 3.

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).

**Tabla 3** Ejemplo de la matriz  $M$  representando una programación del UTP estudiado en este artículo

(A,X,G1)
(B,Y,G2)
(C,Z,G1)
(C,W,G2)

(a) Tuplas

	Bloque de Tiempo 1	Bloque de Tiempo 2
Aula1	(A,X,G1)	(C,Z,G1)
Aula2	(C,W,G2)	(B,Y,G2)

(b) Una programación en  $M$

**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.

**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  $M$ .

**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 objetivos 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 favorece la prioridad preestablecida entre los tres objetivos expuestos; las funciones son resumidas en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Conjunto de funciones de evaluación usadas en el SA

Nomenclatura	Orden de prioridad	Ecuación
CGT	Aulas, grupos y maestros	—
GCT	Grupos, aulas y maestros	—
TCG	Maestros, aulas y grupos	—
CTG	Aulas, maestros y grupos	—
GTC	Grupos, maestros y aulas	—
TGC	Maestros, grupos y aulas	—
ALL	No hay prioridad	—

El significado de la nomenclatura es el número de aulas requeridas para hacer la asignación, y es el número máximo de aulas existentes. son las horas totales entre las clases de los maestros; donde representa el valor que excede el escenario del peor caso en la asignación de los bloques de tiempo a los profesores. son las horas totales entre los grupos de clases. Por ejemplo, las horas donde el grupo no tiene ninguna asignatura asignada; donde simboliza un valor que excede el escenario del peor de los casos de clases libres en los grupos.

Finalmente, el factor  $F$  es un valor suficientemente grande que junto con los valores máximos, evitan que uno de los objetivos de interés afecte a los otros, en la parte entera del resultado de la función objetivo.

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  $\alpha$ , y la longitud de la cadena de Markov  $L$ . Los valores considerados fueron tomados de la literatura y son presentados en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Valores probados para cada uno de los parámetros considerados del SA

Parámetros	Valores		
	0	1	2
$T_i$	15	10	1
$T_f$	0.001	0.000001	0.000000001
$\alpha$	0.99	0.95	0.90
$L$	10	100	1000

### 3.3 Resultados experimentales

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-Rios, Quiz-Ramos, 2009).

Un Covering Array (CA) (Avila-George, H., Torres-Jimenez, J., Hernandez, V., 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  $t$  (donde  $t$  es la fuerza) ocurra al menos una vez en cada posible selección de  $t$  elementos de los vectores.

Los experimentos diseñados están basados en una instancia  $\beta$  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 de evaluación, 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. Posteriormente, fueron comparadas para identificar la mejor función de evaluación para el enfoque. Para este propósito, cada configuración fue usada para solucionar la instancia 31 veces, y los valores mínimos, máximos y promedios fueron obtenidos.

Las características más relevantes de la instancia del UTP son descritas en la Tabla 3.3(a). Los parámetros de configuración de SA se muestran en la Tabla 3.3(b).

**Tabla 3.3** Atributos de experimentación

	Bloque de	
	Tiempo 1	Tiempo 2
(A,X,G1)	Aula1	(C,Z,G1)
(B,Y,G2)	Aula2	(B,Y,G2)
(C,Z,G1)		
(C,W,G2)		

(a) Instancia de UTP

(b) Configuración de parámetros del SA

Un resumen de los resultados derivados a partir del diseño de la experimentación es presentado en la Tabla 5. 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. Para entender los valores de la función de evaluación, el factor  $F$  es dado; cada función de evaluación (con la única excepción de todas), tiene una prioridad en la minimización de los objetivos: número de aulas, tiempo libre de los maestros y tiempo libre de los grupos.

Dado un valor  $C$  resultado de la evaluación de una de esas funciones, la información correspondiente para cada elemento puede ser inferida de ellos.

Por ejemplo, en el caso de CGT, al dividir  $C$  entre  $F$  y obtener la parte entera del resultado, se obtiene el número de aulas usadas (debido a que el número de aulas tienen la prioridad principal); al obtener el residuo de la parte entera de la división de  $C$  entre  $F$ , se obtiene el número de horas libres de los grupos (la segunda prioridad); y finalmente, la parte fraccional corresponde al porcentaje del total de horas de los maestros que esta sin asignar, es decir libre. El resto de las funciones pueden ser interpretadas de manera similar, considerando el factor  $F$  y la prioridad señalada para cada una de ellas.

### 3.4 Discusión

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3.3 el máximo tiempo requerido fue de alrededor 28 segundos, en la configuración (TGC,8). También, dependiendo de la función de evaluación empleada, diferentes resultados fueron obtenidos, por ejemplo la reducción en el número de aulas (el mínimo fue 6), la reducción en el tiempo libre de los maestros (el cual en varias configuraciones fue de 0, por ejemplo todas las configuraciones en la función de evaluación TCG). También, hubo casos donde el número de horas libres en los grupos fue reducido a 0. Sin embargo en ninguno de los casos fue posible alcanzar un 0 en el tiempo libre tanto de maestros como de grupos en conjunto, no en una solución que considere el mínimo número de aulas.

La Figura 3.1 resume el comportamiento de las mejores configuraciones para cada función de evaluación. Estas configuraciones fueron escogidas debido a que mostraron una minimización balanceada en diferentes objetivos, con una clara reducción en los valores prioritarios. Algunos de ellos mejoran rápidamente la solución inicial, por ejemplo GTC, TGC, pero mantienen la misma solución durante el proceso. Otras tienen una curva más suave pero alcanzan también buenos resultados al final, por ejemplo CTG, GCT. Es importante señalar que cuando no se especifica una prioridad, la solución obtenida varía mucho y ninguna de ellas obtuvo un valor mínimo como los obtenidos en las otras configuraciones.

### 3.5 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 minutos.

El enfoque presentado está basado en el algoritmo de Recocido Simulado (SA). El SA trabajó con un conjunto de diferentes funciones de evaluación, cada una de las cuales tiene una prioridad reflejada en su definición. Fue posible obtener una asignación empleando solo 6 de las 17 aulas disponibles, pero teniendo casi el 10% de maestros con el número máximo de horas disponibles y un total de 30 horas libres entre los grupos.

Muchos resultados fueron obtenidos con las otras funciones de evaluación con su prioridad establecida.

Finalmente, el trabajo presentado puede ser extendido para incluir 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.

### **3.6 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 PROMEP /103.5/12/3620 del Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP)

### **3.7 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-Rios, J., Quiz-Ramos, P.: Problem and algorithm fine-tuning - a case of study using bridge club and simulated annealing. In: A. Douado, 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).

Werra, D.D.: An introduction to timetabling. . European Journal of Operational Research 19, 151–162 (1985).

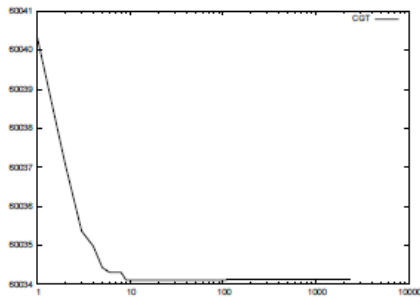
Yang, S., Jat, S.: Genetic algorithms with guided and local search strategies for university course timetabling. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on 41(1), 93–106 (2011).

**Anexo-Tabla 3.4** Resumen del desempeño del SA usando cada una de las diferentes configuraciones consideradas. El símbolo - significa que el factor F no fue necesario en la función de evaluación

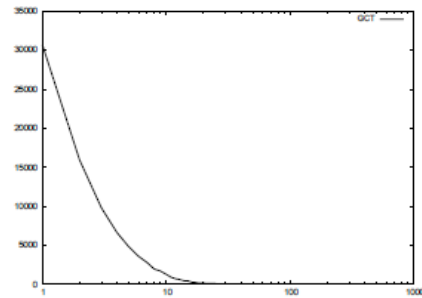
No.	Función de Evaluación	Configuración	F	Costo Mínimo	Costo Máximo	Costo Promedio	Tiempo Mínimo	Tiempo Máximo	Tiempo Promedio
1	CGT CGT CGT	0	10000	60032.105	60043.105	60035.976	186	1032	276.51
2	CGT CGT CGT	1	10000	60032.105	60042.050	60034.359	60	131	72.16
3	CGT CGT CGT	2	10000	60028.121	60043.035	60035.121	38	127	51.12
4	-----	3	10000	60028.109	60043.035	60035.457	281	887	362.09
5	----- GCT	4	10000	60030.105	60042.050	60034.109	4222	5391	4702.25
6	GCT GCT GCT	5	10000	60031.109	60043.035	60035.191	246	1104	324.54
7	GCT GCT GCT	6	10000	60030.105	60043.035	60034.875	8012	10668	9062.25
8	GCT GCT	7	10000	60030.105	60043.035	60035.421	1611	2652	2008.93
9	-----	8	10000	60030.105	60042.050	60033.691	24273	30060	26681.35
----- TCG -----									
-	TCG TCG TCG	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10	TCG TCG TCG	--	--	8.163	1009.148	73.794	134	-	267.80
11	TCG TCG	0	1000	8.135	1010.120	170.564	47	1137	70.83
12	-----	1	1000	8.145	1009.126	41.216	28	155	50.06
13	----- CTG	2	1000	8.166	1010.111	170.691	202	138	280.54
14	CTG CTG CTG	3	1000	8.154	1010.111	138.180	3225	897	4413.48
15	CTG CTG CTG	4	1000	8.151	1010.129	138.116	161	6772	337.90
16	CTG CTG	5	1000	8.141	1010.111	138.276	6023	2342	7447.61
17	-----	6	1000	8.141	1010.101	105.859	1195	9143	1433.03
18	----- GTC	7	1000	8.151	1010.111	138.243	18421	1835	21491.87
-	GTC GTC GTC	8	1000	-----	-----	-----	-----	25338	-----
-	GTC GTC GTC	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
19	GTC GTC	-----	-----	39.470	40046.468	21976.814	-191	-----	295.09
20	-----	--	--	38.470	40046.468	11331.440	60	-	72.83
21	----- TGC	0	1000	38.529	40046.468	15203.224	37	1101	72.67
22	TGC TGC TGC	1	1000	36.529	40046.468	12621.868	298	147	379.22
23	TGC TGC TGC	2	1000	38.529	40046.468	14235.960	4344	655	4868.35
24	TGC TGC	3	1000	39.470	40046.468	17783.710	242	944	333.19
25	-----	4	1000	38.470	40046.468	18106.832	8540	6297	10819.77
26	----- ALL	5	1000	36.529	40040.531	11653.583	1497	1154	1893.38
27	ALL ALL ALL	6	1000	36.529	40046.468	16170.650	26232	17212	28083.48
-	ALL ALL ALL	7	1000	-----	-----	-----	-----	3153	-----
-	ALL ALL	8	1000	-----	-----	-----	-----	30896	-----
28	-----	-----	-----	60005.304	60013.269	60006.632	195	-----	317.41
29	-----	-----	-----	60005.304	60013.269	60006.632	64	-----	78.41
30	-----	--	--	60005.304	60017.242	60006.570	41	-	55.41
31	-----	0	10000	60005.304	60013.269	60007.664	300	1283	446.38
32	-----	1	10000	60005.304	60013.269	60006.250	4379	135	4920.54
33	-----	2	10000	60005.304	60013.269	60006.503	254	145	378.22
34	-----	3	10000	60005.304	60013.269	60006.753	8477	1552	9441.19
35	-----	4	10000	60005.304	60026.261	60007.179	1627	5401	1873.64
36	-----	5	10000	60005.304	60013.269	60006.828	26626	585	28019.58



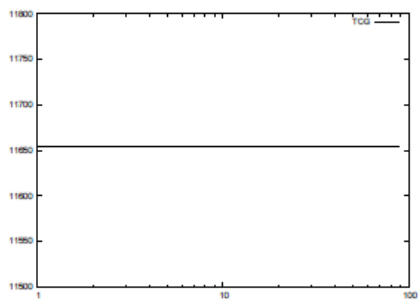
### Anexo-Grafico 3 Gráfica del comportamiento del SA



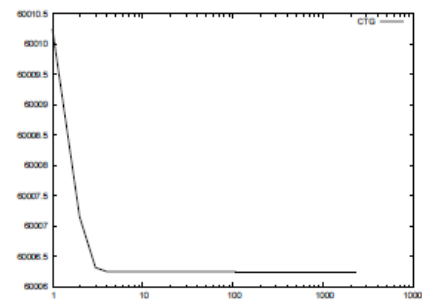
(a) CGT, Config. 4



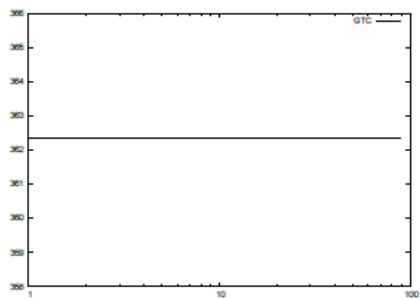
(b) GCT, Config. 2



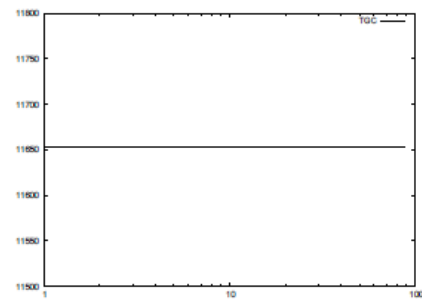
(c) TCG, Config. 7



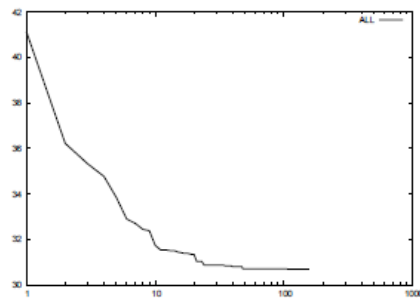
(d) CTG, Config. 4



(e) GTC, Config. 7



(f) TGC, Config. 7



(g) ALL, Config. 3