

Um Protótipo de Busca Tabu para o Problema das Grades Horárias Escolares

Luis A. C. Oliveira, Antonio C. Oliveira

Departamento de Informática e Estatística
Universidade Federal do Piauí (UFPI) – Teresina, PI – Brasil

luisandreolli@gmail.com, costa@ufpi.br

Abstract. Every start of the school year, various educational institutions need to make the distribution of times for teachers. In most cases, particularly where resources (availability of the teacher) are restricted, the problem for the construction of school operating hours proves to be quite challenging. This is considered a famous combinatorial optimization problem difficult to solve. Due to the large number of combinations of decision variables, the exact methods for this application proves the most part ineffective. In this context, there are the metaheuristics such as tabu search, which seeks good solutions at a reasonable computational cost. The aim of this paper is to present a prototype for generating school operating hours, using the tabu search metaheuristic, which will assist in finding a viable and good quality.

Resumo. Todo começo de ano letivo, várias instituições de ensino precisam fazer a distribuição dos horários para os professores. Na maioria dos casos, particularmente onde recursos (disponibilidade do professor) são restritos, o problema para a construção de grades horárias escolares se mostra bastante desafiador. Este é considerado um famoso problema de otimização combinatória de difícil resolução. Devido ao grande número de combinações entre as variáveis de decisão, a aplicação deste por métodos exatos se mostra na maioria das vezes ineficaz. Nesse contexto, surgem as metaheurísticas, como a busca tabu, como métodos que procuram boas soluções a um custo computacional razoável. O objetivo deste trabalho é apresentar um protótipo de geração de grades horárias escolares, utilizando a metaheurística busca tabu, que vai auxiliar a encontrar uma solução viável e de boa qualidade.

1. Introdução

Um problema de otimização combinatória P na sua forma de minimização pode ser formulado da seguinte forma: Dado um conjunto finito $e = \{1, 2, \dots, n\}$, o conjunto de soluções viáveis $F \subseteq 2^e$ de P , e uma função objetivo $f: 2^e \rightarrow \mathbb{R}$, queremos encontrar $S^* \in F$ tal que $f(S^*) \leq f(S)$, Para todo $S \in F$, onde $f(S)$ é a função objetivo definida como $f(S) = \sum_{e \in S} c(e)$ e $e \in S$, na qual $C(e)$ é o custo de incluir $e \in S$ na solução S . Para um problema específico de otimização combinatória. Os conjuntos e e F , como também a função $C(e)$ precisam ser definidos, Resende (2003).

Podemos enumerar alguns exemplos desse tipo de problema, como: o problema das grades horárias escolares, o problema de roteamento de veículos, o problema do particionamento de grafos, o problema da mochila 0-1, o problema do caixeiro viajante, etc. A principal dificuldade em se tratar problemas de otimização combinatória reside no grande número de combinações existentes entre as variáveis de decisão que compõem o modelo do problema. Este número de combinações resulta num espaço de busca muito grande, impossibilitando a aplicação eficaz de métodos exatos a um custo computacional razoável, Reeves (1993).

Nesse contexto, surgem as heurísticas. Esses métodos têm como principal objetivo encontrar soluções de boa qualidade, com um baixo custo computacional. As heurísticas procuram boas soluções para certos tipos de problemas a um custo computacional razoável, mas não garantem encontrar a viabilidade ou otimalidade do problema, Reeves (1993).

Em uma heurística de busca local, a ideia é partir de uma solução inicial e navegar interativamente pelo espaço da busca, movendo-se, em cada passo, de uma solução para uma solução vizinha (adjacente). A principal desvantagem deste tipo de heurística é que este para no primeiro local ótimo encontrado. Tal desvantagem serviu como base para o advento das metaheurísticas.

O surgimento das metaheurísticas para resolução de problemas de otimização combinatória, é uma das realizações mais notáveis das últimas três décadas em pesquisa operacional, e.g. Gendreau and Potvin (2005). A metaheurística é um processo de geração iterativa que guia uma heurística subordinada por combinar, inteligentemente, conceitos diferentes para investigar e explorar o espaço de busca, e utilizar estratégias de memorização para estruturar informações a fim de obter soluções eficientes e próximas do ótimo global, Osman and Laporte (1996).

As principais metaheurísticas são: Busca Tabu, Algoritmo Genético, Colônia de Formigas, *Simulated Annealing*, Busca em Vizinhança Variável, GRASP, etc. Nesta perspectiva, trabalhar-se-á com a metaheurística busca tabu aplicada ao problema das grades horárias escolares, que se trata de um famoso problema de otimização combinatória de difícil resolução. A abordagem é testada sobre uma instância fictícia e também uma instância real do problema, derivada da realidade brasileira, típica das escolas de ensino fundamental.

Na próxima seção é apresentada uma breve fundamentação sobre o problema das grades horárias (*Timetabling*). A seção 3 traz uma abordagem sobre busca tabu. Na seção seguinte, apresentam-se as características e classificações do problema das grades horárias escolares e as instâncias dos problemas avaliados, uma fictícia e outra real. Na seção 5 são descritas as estratégias da busca tabu aplicada a instância dos problemas das grades horárias escolares propostos. Na seção 6 são apresentados e discutidos os resultados computacionais. Na última seção são expostas as conclusões obtidas e pesquisas futuras.

2. O Problema das Grades Horárias (Timetabling)

Problemas de *timetabling* são onipresentes em muitas áreas da nossa vida diária como trabalho, educação e entretenimento. Na maioria dos casos do mundo real, particularmente onde recursos (como pessoas, espaços ou tempo) não estão em abundância, o problema de construir horários se mostra bastante desafiador, até para o mais experiente construtor de horários, Lewis (2006). *Timetabling* é um problema de escalonamento de natureza combinatória sujeito a restrições, onde uma coleção de eventos deve acontecer dentro de um período finito de tempo, de modo que recursos não podem ser solicitados por dois ou mais eventos simultaneamente ou devem existir em uma quantidade suficiente para atender a todos os eventos durante o tempo de escalonamento. No geral tem sido mostrado que os problemas do tipo *Timetabling* são NP-Árduo, Carter (1992). No contexto dos problemas de *timetabling*, este trabalho tem como finalidade o estudo e a solução de um problema específico: o problema das grades horárias escolares, que é uma atividade regular ao processo de gestão escolar.

Em resumo, o problema consiste em distribuir os períodos das aulas de tal modo que nenhum professor ou classe esteja envolvido em mais de uma aula num dado período e de forma que cada professor ministre um número especificado de aulas para cada classe. Estes são exemplos de restrições fortes do problema, ou seja, restrições que não podem ser negligenciadas. Existem ainda outras restrições como, por exemplo, atender as preferências de horários dos professores; aumentar o número de aulas consecutivas (geminadas) de uma mesma matéria ministrada por um mesmo professor em uma dada classe; evitar períodos ociosos nos horários dos professores, entre outras. Estas últimas são classificadas como restrições fracas e podem ser violadas, desde que com parcimônia e quando houver necessidade, Moura (2004).

3. Busca Tabu

Busca Tabu é uma metaheurística baseada em busca local desenvolvida por Glover et al. (1989) para resolver problemas de otimização combinatória e tem sido aplicada com sucesso a uma variedade de problemas, e.g. Glover e Laguna (1997). Iniciando de uma solução viável, a busca move de uma solução para outra escolhendo a melhor solução na vizinhança da atual solução, através de um movimento que não esteja na lista tabu (lista de movimentos proibidos). Movimentos com certos atributos podem ser proibidos para evitar ciclagem, e para guiar o processo de busca em direção a regiões ainda não exploradas. Critérios de Aspiração podem remover a condição tabu de um movimento quando este se mostrar atrativo naquele momento da busca. Os principais componentes de uma busca tabu são a

memória adaptativa e a *estratégia de busca*. A *memória adaptativa* pode ser dividida em memória de curto e de longo prazo, e serve para armazenar informações sobre a evolução da busca, enquanto que, a *estratégia de busca* usa estas informações para guiar a busca da melhor maneira possível. A memória de longo prazo serve para inserir na busca estratégias de intensificação e diversificação. A intensificação consiste em explorar regiões do espaço de busca que se mostram mais promissoras. Enquanto, diversificação procura levar a busca a regiões inexploradas do espaço de busca.

4. Descrição do Problema das Grades Horárias Escolares

O problema das grades horárias escolares abordadas neste trabalho consiste em um conjunto de m matérias $\{M_1, \dots, M_m\}$ ministradas em t turmas $\{T_1, \dots, T_t\}$ por p professores $\{P_1, \dots, P_p\}$, distribuídas semanalmente em d dias, cada um com h horários fixos e em um único turno. Foram propostas duas instâncias: uma instância fictícia (IF), baseada em pesquisas e observações e uma aplicada a uma instância real (IR) do problema, através de uma série de entrevistas numa escola municipal de nível fundamental.

As seguintes situações foram encontradas na instância real (IR) de uma escola municipal de ensino fundamental: Cada horário h corresponde a 50 minutos; Teremos como o conjunto das m matérias {Português, Matemática, Ciências, História, Geografia, Inglês, Filosofia, Artes, Religião, Educação Física}; O conjunto das t turmas será {6ºAno A, 6ºAno B, 6ºAno C, 6ºAno D, 6ºAno E, 7ºAno A, 7ºAno B, 7ºAno C, 8ºAno A, 8ºAno B, 9ºAno A, 9ºAno B}; O conjunto dos h horários fixos diários será {13:00, 13:50, 14:40, 15:40, 16:30, 17:20}.

A disposição da carga horária semanal das m matérias para cada turma é dada pela tabela a seguir:

Matéria	Carga Horária Semanal (horas/aulas)
Português	5 h/a
Matemática	5 h/a
Ciências	3 h/a
História	3 h/a
Geografia	3 h/a
Inglês	2 h/a
Filosofia	1 h/a
Artes	2 h/a
Religião	1 h/a
Educação Física	1 h/a
TOTAL	26 horas/semanais

Tabela 1 – Carga Horária Semanal Disciplinas - IR

As seguintes situações foram propostas na instância de uma escola fictícia (IF): Cada horário h corresponde a 50 minutos; Teremos como o conjunto das m matérias {Português, Matemática, Ciências, História, Geografia, Inglês, Artes, Religião, Filosofia}; O conjunto das t turmas será {6ºAno, 7ºAno, 8ºAno, 9ºAno}; O conjunto dos h horários fixos diários será {07:00, 07:50, 08:40, 09:30, 10:20, 11:20}.

A disposição da carga horária semanal das m matérias para cada turma é dada pela tabela a seguir:

Matéria	Carga Horária Semanal (horas/aulas)
Português	5 h/a
Matemática	5 h/a
Ciências	3 h/a
História	3 h/a

Geografia
Inglês
Artes
Religião
Filosofia
TOTAL

Tabela 2 – Carga Horária Semanal Disciplinas - IF

A solução que se deseja encontrar é uma grade horária viável e de boa qualidade. Ou seja, a viabilidade entendida como ausência de fatores que impeçam que uma determinada aula se realize naquele horário e a qualidade entendida como características não essenciais, porém desejáveis em um quadro de horários.

As restrições por parte do desenvolvimento pedagógico como também as questões operacionais das turmas são divididas em restrições fortes e fracas. As restrições fortes são aquelas nas quais depende a viabilidade da solução, e as restrições fracas são aquelas nas quais depende a qualidade da solução, mas que não acarreta necessariamente a inviabilidade da solução. As restrições fortes do problema específico baseada na instância real são as seguintes: A carga horária carga semanal da turma deve ser satisfeita (26 h/s); A carga horária semanal dos 23 professores devem ser satisfeitas; A carga horária semanal de uma disciplina deve ser satisfeita; Em cada horário não poderá ter mais que um professor na turma; Em cada horário o professor não poderá ministrar aulas para mais de uma turma; O professor não poderá ser alocado em um horário em que o mesmo não esteja disponível; Não ultrapassar o número máximo de aulas diárias de uma matéria; Na instância fictícia, a única restrição forte que difere da instância real diz respeito à carga semanal da turma que é 25 h/s.

Quanto à complexidade do problema, na instância real existem professores com mais de uma disciplina (4 professores), a disponibilidade dos professores é 20% além da sua carga horária semanal. Na instância fictícia, todos os professores lecionam apenas uma matéria.

As restrições fracas para ambas as instâncias são propostas a seguir: Atender ao maior número possível de aulas geminadas, ou seja, aulas de uma mesma disciplina realizadas em dois horários consecutivos em um mesmo dia numa mesma turma.

5. Busca Tabu para o Problema das Grades Horárias Escolares de Ensino Fundamental

Problemas de programação de grades horárias são particularmente acessíveis para serem solucionados por busca local e facilitam o surgimento de novas vizinhanças. Abramson (1991) usou um tipo de estrutura de vizinhança baseado em permutar o horário de um evento simples no seu algoritmo *Simulated Annealing* para o problema de grades horárias escolares. Além disso nos últimos anos vários autores tem tentado adaptar o método da busca tabu para resolver problemas do tipo *Timetabling*, Hertz (1991). Seguem as estratégias implementadas neste trabalho para a busca tabu:

Uma vizinhança N corresponde ao conjunto de todas as grades horárias que se pode obter a partir de uma solução S. Tomando-se duas aulas quaisquer representadas respectivamente pelas triplas $[t, d1, h1]$ e $[t, d2, h2]$, onde t é a turma a que pertencem as aulas, di é o dia e hj o horário em que as respectivas aulas ocorrem, entende-se por movimento a simples troca de matérias diferentes alocadas para estes mesmos horários. A seguir segue o movimento usado neste trabalho:

Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
Matemática	Ciências	Português	Matemática	História
Ciências	Artes	Religião	Geografia	Inglês
Português	Ciências	História	Artes	Geografia
Matemática	Português	Matemática	Ciências	Inglês
Português	Português	História	Geografia	Matemática

Figura 1 – Movimento na Grade

Quanto à lista de candidatos foi observado que por se tratar de um problema de natureza combinatória, a vizinhança é muito grande. Observou-se que para o problema fictício (IF) das grades escolares com quatro turmas, cada uma delas com 25 aulas, serão sempre avaliadas 1200 movimentos. Para o problema real (IR) com 12 turmas, cada uma delas com 26 aulas e 30 horários disponíveis para alocação, serão avaliados 5220 movimentos. Observou-se que quanto maior o número de candidatos que se avalia da vizinhança, melhor é a qualidade da solução obtida, embora com um custo computacional maior. A seguir são apresentadas as estratégias de memória de longo prazo (diversificação e intensificação) para a busca tabu implementada.

Para a diversificação foi usada uma técnica proposta por Burke e Kendall (2005), nessa estratégia a busca é reiniciada, introduzindo elementos que foram raramente encontrados nas soluções correntes. Os elementos das soluções são organizados em uma fila de prioridade reversa, adicionando-se aqueles elementos com menores frequências das soluções correntes. Já na estratégia de intensificação a busca é reiniciada, introduzindo aqueles elementos em comum, encontrado nas soluções que são ótimos locais. Esses elementos são “fixados” durante k iterações, assim explorando uma porção do espaço de busca que se mostra promissora. A seguir é apresentado o algoritmo usado, para S (conjunto de soluções viáveis) e s^* (melhor solução encontrada até o momento):

Passo 1: Selecione uma solução $s \in S$. Faça $s^* = s$.

Passo 2: Gere um subconjunto V contido em $N(s)$ tal que cada elemento de V não é Tabu ou satisfaz o critério de aspiração.

Passo 3: A cada 90 iterações, reinicie a busca e diversifique-a, adicionando na nova solução aqueles elementos com menores frequências.

Passo 4: A cada 360 iterações, reinicie a busca e intensifique-a, colocando na solução correntes os elementos em comum das soluções que são os 3 melhores mínimos locais encontrados até a presente iteração. Fixe esses elementos em comum nas próximas 60 iterações.

Passo 5: Escolha a melhor solução $v \in V$.

Passo 6: Se v for mínimo local, armazene-o.

Passo 7: Armazena a solução v numa matriz de residência.

Passo 8: Se v é melhor que s^* então $s^* = v$.

Passo 9: Faça $s = v$.

Passo 10: Atualize a Lista Tabu.

Passo 11: Se o critério de parada for satisfeito vá ao passo 12, caso contrário vá ao passo 2.

Passo 12. Retorne s^* .

6. Resultados Computacionais

Todos os testes foram implementados na linguagem de programação JAVA e executados em uma máquina com o sistema operacional *Windows 7 Home Premium*, processador *Core 2 Duo*, 1.7 Ghz, 2 GB de RAM.

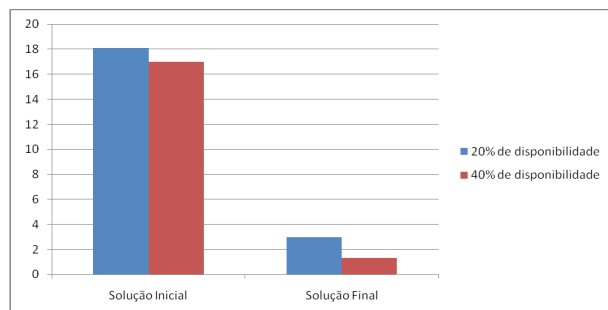
Usando as instâncias expostas do problema das grades escolares, parâmetros e estratégias da busca tabu apresentados, foram propostos os seguintes parâmetros: quanto a função objetivo, resultados bem sucedidos têm sido relatados usando uma função de custo, o qual combina todos os objetivos e restrições em uma simples soma ponderada. Abramson (1991) usou esta abordagem em um problema de programação de grades horárias escolares e Forbes (1994) usou também esta abordagem com sucesso na programação de grades horárias de ônibus. Assim para a construção da função objetivo, que é uma função feita para avaliar uma solução s , tomou-se como base o uso de duas componentes, uma de inviabilidade $g(s)$, encarregada de medir as restrições que ocasionam inviabilidade da solução, e outra $h(s)$ encarregada

de medir as restrições que mede o não atendimento das restrições fracas. Neste trabalho as restrições fracas contêm somente o não atendimento das aulas geminadas. A função objetivo é representada por: $f(s) = g(s) - h(s)$.

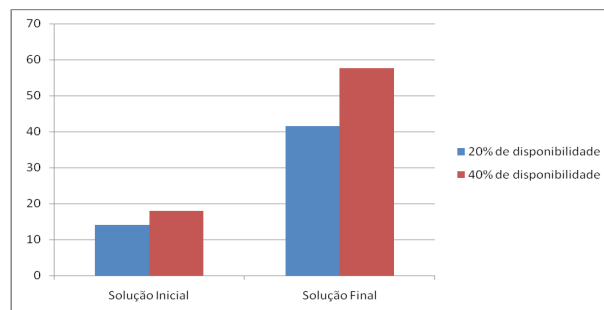
Para geração da solução inicial foi usado uma heurística construtiva que percorre as grades horárias escolares de cada turma do início ao fim sequencialmente. Seguem as duas etapas do algoritmo: Na primeira etapa o algoritmo percorre cada turma da grade horária escolar e procura alguma disciplina em que seu professor esteja disponível, respeitando a carga horária da disciplina na respectiva turma; Na segunda etapa, o algoritmo procura horários nas turmas que ainda estejam livres, alocando assim as aulas restantes, mesmo que o professor da disciplina esteja indisponível para o horário ou já tenha sido alocado para outra turma.

Para a obtenção dos pesos das componentes foram feitos exaustivos testes computacionais quanto à ocorrência das restrições fortes e fracas que ocorrem na solução inicial. Como queremos eliminar primeiramente aquelas restrições que causem inviabilidade, atribuímos o maior peso à restrição de disponibilidade e menor peso à restrição das aulas geminadas. Com isso foram propostos os seguintes pesos: Peso para aulas geminadas: 10; Peso para aulas que excedem o máximo permitido diário: 200; Peso por choque de horários: 1000; Peso por indisponibilidade do professor: 10000.

Com o objetivo de verificar o desempenho da Busca Tabu implementada, foram geradas e testadas 10 instâncias para a distribuição de carga horária para professor com 20% de disponibilidade, além da sua carga horária semanal e 10 instâncias para professor com 40% de disponibilidade, além de sua carga horária semanal. A seguir são apresentados os resultados para a Instância Fictícia (IF):



(a)



(b)

Figura 2 – Número de aulas inviáveis – IF (a) e Número de aulas geminadas – IF (b)

Das execuções que foram feitas foi possível extrair a frequência de cada uma das restrições das soluções iniciais e finais: o número de aulas que o professor está indisponível na solução inicial é, em média, ligeiramente superior a 8, em todas execuções, esse tipo de inviabilidade foi retirado na solução final; a quantidade de aulas que excedem o máximo diário permitido na solução inicial é, em média, um pouco inferior a 10, também ao final da execução, esta restrição foi retirada de todas as instâncias testadas; as aulas alocadas para mais de uma turma em um mesmo horário na solução inicial é em média inferior a 8, ao final da execução do método, é a única medida de inviabilidade que não foi retirada totalmente. Observamos através da figura 1, que na solução final, a média do número de aulas inviáveis para a disponibilidade do professor com 20%, além da sua carga horária semanal, é igual a 3 e com a disponibilidade de 40%, para além de sua carga horária semanal, é igual a 1,3. Como ao término da execução há apenas um tipo de inviabilidade (choque de horários), deduz-se que apenas um professor é afetado ao término da execução, pois um choque de horário envolve de 2 a 3 aulas.

Na figura 2, podemos perceber que o número de aulas geminadas aumenta consideravelmente, para as duas disponibilidades. Na solução inicial, em média apenas 14 e 18 aulas são aulas geminadas para o professor com 20% e 40% de disponibilidade além da sua carga horária semanal, respectivamente. Ao final da execução obtemos 42 aulas geminadas para a disponibilidade com folga de 20%, e 58 aulas geminadas para a disponibilidade com folga de 40%. O tempo computacional para a resolução dos testes foi em média 90 segundos.

A seguir são apresentados os resultados para a instância real:

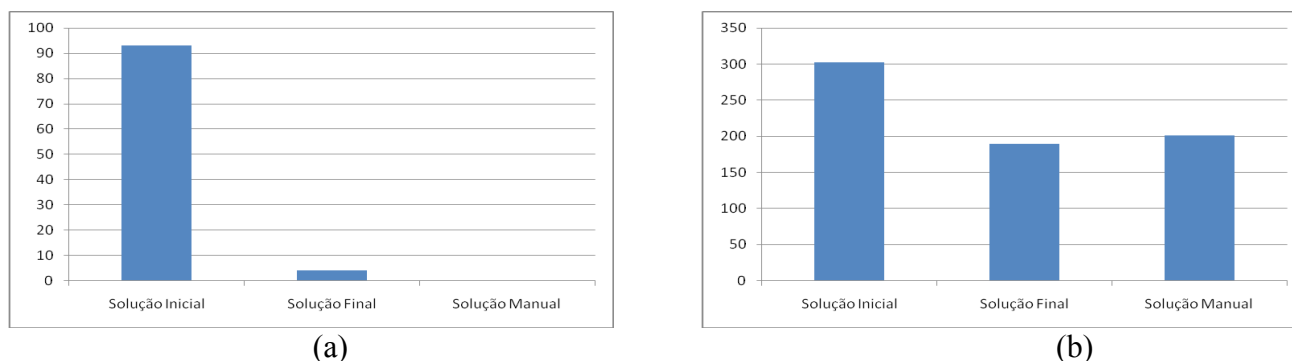


Figura 3 – Número de aulas inviáveis – IR (a) e Número de aulas geminadas – IR (b)

Para a instância real, foram propostas as seguintes modificações no método utilizado na seção anterior: Diversificação a cada 500 iterações e após duas diversificações, a estratégia da intensificação é iniciada, durante 150 iterações os elementos promissores são fixados. Através da Figura 3, percebemos que há uma melhora significativa da solução inicial, em relação à solução final quanto às aulas inviáveis. Ao final da execução, foram encontradas quatro aulas inviáveis, que corresponderam a dois choques de horário. Como possuímos 30 horários que podem ser alocados e 26 horários para completar a carga horária semanal da turma, o construtor de horários, valendo-se de sua experiência poderá negociar com os dois professores com choque de horários, para a alocação nos quatro horários vagos. É importante ressaltar que na grade gerada manualmente não existiram inviabilidades, devido a negociações com os professores para a retirada da inviabilidade.

Na figura 3 (b), observamos que a quantidade de aulas geminadas gerada na solução final se iguala praticamente ao gerado pela solução manual. Em relação à solução inicial, como possuímos duas restrições conflitantes, que são aulas geminadas e aulas que excedem o máximo permitido diário, é de se notar que haverá diminuição na quantidade de aulas geminadas ao final da execução do método. O tempo para a construção da grade manual foi em torno de três semanas. A execução deste método para esta instância foi realizada em 2000 iterações e o tempo computacional foi de 58 minutos.

7. Conclusão e Trabalhos Futuros

No presente trabalho foi possível perceber a complexidade de implementar um sistema de geração de grades escolares atendendo às restrições pedagógicas, operacionais e às preferências de cada professor. A utilização da metaheurística busca tabu requer um relativo conhecimento do problema para que assim se possam ajustar os parâmetros de forma adequada. Para determiná-los foi necessária a execução de exaustivos testes computacionais. Como trabalho futuro, serão investigadas novas estratégias de intensificação e diversificação para se tentar obter soluções com 0% de inviabilidade. Pretende-se também desenvolver uma versão paralela de uma busca tabu para a aplicação no problema das grades horárias escolares, com vistas a resolver instâncias maiores e mais complexas do referido problema com um menor tempo computacional do que as versões da busca tabu sequencial e ainda assim obtendo soluções de melhor qualidade. Será investigado ainda, a aplicação e o desenvolvimento de uma busca tabu com vizinhança variável e a construção de uma interface gráfica amigável, para o construtor de horários monitorar a construção de horário e com sua experiência fazer os ajustes finais.

8. Referências

- Abramson, D. (1991) "Constructing school timetables using simulated annealing: sequential and parallel algorithms". *Management Science*. Vol 37, p. 98-131.
- Burke, E.K. & Kendall, G. (2005) "Search Methodologies – Introduction Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques". Springer. Vol. 1, p.175-176.
- Carter, M.W. & Tovey, A. (1992) "When is the Classroom Assignment Problem Hard?". *Operations Research Society*.
- Forbes, M. & Holt, J & Kilby, P & Watts, A. (1994) "A software system for bus dispatching". *J. Opl. Res. Soc.* Vol 45, p. 497-508.
- Gendreau, M. & Potvin, J.Y. (2005) "Metaheuristics in Combinatorial Optimization". *Annals of Operation Research*. 140, 189-213.
- Glover, F. (1989) "Tabu search, part I". *ORSA Journal on Computing*, v.1, n.3, p.190-206.
- Glover, F. & Laguna, M. (1997) "Tabu Search", Kluwer. Academic Publishers.
- Hertz, A. (1991) "Tabu Search for Large Scale Timetabling Problem". *European Journal of Operational Research*.
- Lewis, R.M.R. (2006) "Metaheuristics for University Course Timetabling". Napier University. Thesis for the degree PHD.
- Moura, A. & Scaraficci, R. & Silveira, R. & SANTOS D.V. (2004) "Técnicas Metaheurísticas aplicadas a construção de grades horárias escolares". UNICAMP.
- Osman, I.H. e Laporte, G. "Metaheuristics: A Bibliography, In: *Annals of Operations Research* 63" (1996), 513-623. J.C. Biltzer AG, Science Publishers.
- Reeves, C. R. (1993) "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems". Oxford: Blackwell Scientific Press.
- Resende, M.G.C. e Ribeiro, C. C. (2003) "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures". In: *Handbook of Metaheuristics*, F. Glover e G.A. Kochenberger. Kluwer, p.219-250.